

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění a montáže

**Návrh softwaru pro optimalizaci řezných
podmínek**

**Software Proposal to Optimization of Cutting
Conditions**

Student:

Bc. Marek Pagáč

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Marek Sadílek, Ph.D.

Ostrava 2011

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění a montáže

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Marek Pagáč**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Téma: **Návrh softwaru pro optimalizaci řezných podmínek**
Software Proposal to Optimization of Cutting Conditions

Zásady pro vypracování:

1. Úvod do problematiky optimalizace řezných podmínek.
2. Numerické metody výpočtu optimalizace.
3. Návrh softwaru pro optimalizaci řezných podmínek.
4. Závěry pro realizaci v praxi.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. *Nové směry v progresivním obrábění*. E-learningové prvky pro podporu výuky odborných a technických předmětů. Ostrava : Ediční středisko VŠB-TUO, 2007, 251 s. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [2] MÁDL, J. *Optimalizace řezných podmínek v teorii obrábění*. Praha : ČVUT Praha, 1988. 57 s.
- [3] SADÍLEK, M. *CAM systémy v obrábění I. - II. doplněné vydání*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-TUO, 2010, 138 s. ISBN 978-80-248-2278-4.

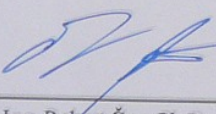
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Marek Sadílek, Ph.D.**

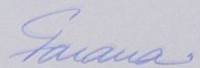
Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011





doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.
vedoucí katedry



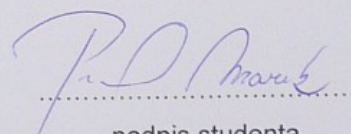
prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Fakulta strojní VŠB-TU Ostrava**Diplomová práce**

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

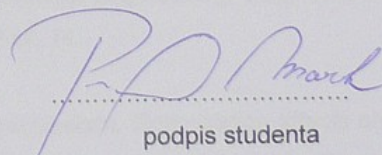
V Ostravě 18.5.2011


.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 - školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo na nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 18.5.2011



podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce: Marek Pagáč, Bc.

Adresa trvalého pobytu autora práce: Jesenická 24/789, Bruntál 792 01

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

PAGÁČ, M. *Návrh softwaru pro optimalizaci řezných podmínek: diplomová práce.* Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2011, 66 s. Vedoucí práce: Sadílek, M.

Diplomová práce se zabývá problematikou řezných podmínek z hlediska jejich optimalizace. Optimalizaci neovlivňují pouze zadané nebo navržené řezné podmínky, ale souvisí s ní výběr stroje, nástrojů a procesní kapaliny a jejich nejdůležitější vlastnosti. Jednotlivé vlastnosti těchto důležitých kritérií, bez kterých by nemohl samotný proces obrábění probíhat, jsou mezi sebou provázané a souvisí spolu. Tyto optimalizační vazby jsou velmi složité a lze je řešit pouze na počítači při použití vhodných optimalizačních algoritmů. Cílem této diplomové práce je navrhnout vhodný algoritmus v softwaru Microsoft Excel, který by na základě vstupních parametrů sloužil ke stanovení optimálních řezných podmínek.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

PAGÁČ, M. *Software Proposal to Optimization of Cutting Conditions: Master Thesis.* VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Working and Assembly, 2011, 66 p. Thesis head: Sadílek, M.

This thesis deals with the cutting conditions for their optimization. Optimization affects only the specified or proposed cutting conditions, but is related to a selection of machines, tools and process fluids and their most important properties. Individual characteristics of these important criteria, without which the machining process itself could take place are inter-linked and connected. These links optimization is very complex and can be addressed only on a computer using appropriate optimization algorithms. The aim of this thesis is to design an appropriate algorithm in Microsoft Excel, which based on the input parameters, was used to determine the optimum cutting conditions.

Obsah

Obsah	6
Seznam použitých symbolů a značek	8
1 Úvod	10
2 Optimalizace řezných podmínek	12
2.1 Předpoklady pro určení optimálních řezných podmínek	13
2.2 Zásady pro volbu optimálních řezných podmínek	14
2.2.1 Volba optimálních řezných podmínek při hrubování	15
2.2.2 Volba optimálních řezných podmínek při obrábění načisto	16
3 Rozdělení optimalizace	17
3.1 Konvenční optimalizace	17
3.1.1 Kritérium minimálních výrobních nákladů	18
3.1.2 Kritérium maximální produktivity	21
3.1.3 Vícekriteriální optimalizace	23
3.1.4 Kritérium maximálního zisku	23
3.1.5 Kritérium maximálního úběru	24
3.2 Adaptivní optimalizace	24
3.2.1 Výhody adaptivní optimalizace	24
4 Omezení v optimalizaci řezných parametrů	25
4.1 Omezení dané výkonem obráběcího stroje	25
4.2 Omezení dané maximálně přípustným krouticím momentem	26
4.3 Omezení dané maximální přípustnou silou řezání	26
4.4 Omezení dané vhodným utvářením třísky	27
4.5 Omezení dané požadovanou drsností obrobené plochy	27
4.6 Omezení dané požadovanou přesností obrobené plochy	28
4.7 Omezení dané minimálními a maximálními otáčkami stroje	28
4.8 Omezení dané minimálním a maximálním posuvem stroje	28
4.9 Omezení dané komplexním Taylorovým vztahem	28
4.10 Komplexní omezující podmínka	29
4.11 Organizační omezení	29
5 Optimální trvanlivost nástroje	30
5.1 Analytické a grafické znázornění $T - v_c$ závislosti	30
5.2 Optimální trvanlivost z hlediska maximální výrobnosti	31
5.3 Optimální trvanlivosti z hlediska minimálních výrobních nákladů	34
5.4 Optimální trvanlivost bez uvažování omezujících podmínek	37
5.5 Optimální trvanlivost s respektováním omezujících podmínek	37
6 Oblast přípustných řešení	39
7 Optimalizace obrábění v CAD/CAM systémech	41
8 Návrh softwaru pro optimalizaci řezných podmínek	44
8.1 Způsoby algoritmizace optimalizační úlohy	44
8.2 Možnosti využití výpočetní techniky	44

8.3	Monitorování obráběcího procesu.....	46
8.3.1	Monitorování procesu během obrábění	47
8.3.2	Monitorování procesu po obrábění.....	47
8.4	Adaptivní optimalizace řezných podmínek	51
8.5	Možnosti optimalizace v oblasti CAD/CAM systémů.....	51
8.6	Návrh softwaru v Microsoft Excelu.....	53
8.6.1	Software pro optimalizaci řezných podmínek	56
9	Závěr.....	60
	Použité zdroje	65
	Elektronické zdroje	66
	Seznam příloh	67

Seznam použitých symbolů a značek

$CAM...$	Computer Aided Manufacturing – počítačová podpora dílenských činností – realizována nejen CNC stroji.	[-]
$CNC...$	Computer Numeric Control – počítačové číslicové řízení.	[-]
$C_c.....$	konstanta	[-]
$C_d.....$	cena vyměnitelné břitové destičky	[Kč]
$C_{tn}.....$	cena nástroje	[Kč]
$C_s.....$	cena stroje	[Kč]
$C_T.....$	konstanta	[-]
$C_V.....$	konstanta	[-]
$K_1.....$	konstanta	[-]
$K_2.....$	konstanta	[-]
$K_v.....$	vícekriteriální optimalizace	[-]
$L.....$	celková dráha nástroje	[mm]
$M_k.....$	krouticí moment	[N·mm]
$M_o.....$	hodinová mzda obsluhy stroje	[Kč]
$M_s.....$	hodinová mzda seřizovače	[Kč]
$N_{hs}.....$	hodinová sazba na provoz stroje	[Kč]
$N_n.....$	náklady na nástroj	[Kč]
$N_{nT}....$	náklady na jednu trvanlivost nástroje	[Kč]
$N_s.....$	náklady na provoz stroje	[Kč]
$N_{sn}.....$	náklady na strojní práci	[Kč]
$N_{vn}....$	náklady na vedlejší práci	[Kč]
$N_{vnm}...$	celkové výrobní náklady	[Kč]
$O_s.....$	koeficient časového využití stroje	[-]
$P_e.....$	výkon elektromotoru	[kW]
$T.....$	trvanlivost nástroje	[min]
$U.....$	kritérium maximálního úběru	[mm·min ⁻³]
$VN_u....$	výrobní náklady na uvažovaný operační úsek	[Kč]
$VR_d.....$	výrobní režijní náklady	[Kč]
$a_p.....$	hloubka řezu	[mm]
$f.....$	posuv	[mm]
$k_c.....$	koeficient	[-]
$k_{us}.....$	koeficient údržby stroje	[-]
$k_{ut}.....$	koeficient údržby tělesa nástroje	[-]
$m.....$	exponent	[-]
$n.....$	otáčky	[min ⁻¹]

s_b	součinitel využití břitových destiček	[-]
s_m	směnnost stroje	[-]
t_A	operační čas jednotkové práce	[min]
t_{As}	jednotkový strojní čas	[min]
t_{Av}	jednotkový čas vedlejší práce	[min]
t_{Ax}	čas na výměnu jednoho nástroje	[min]
$t_{Ax,c}$...	celkový čas na výměnu a seřízení nástroje	[min]
t_{vn}	čas na seřízení nástroje	[min]
v_c	řezná rychlost	[m·min ⁻¹]
v_f	posuvová rychlost	[mm·min ⁻¹]
x	počet ostří břitové destičky	[-]
x_{Fc}	exponent, vyjadřující vliv hloubky řezu	[-]
y_{Fc}	exponent, vyjadřující vliv posuvu	[-]
z_b	počet břitů na destičce	[-]
z_d	počet vyměnitelných břitových destiček	[-]
z_{Fc}	exponent, vyjadřující vliv řezné rychlosti	[-]
z_v	počet výměn při obrábění jedné součásti	[-]
η_s	účinnost stroje	[-]

1 Úvod

S pojmem optimalizace se setkáváme nejenom ve strojním průmyslu. Cílem a úkolem optimalizace všeobecně je stanovit výrobní parametry tak, aby byla výroba nejlevnější, nejrychlejší a nej hospodárnější a výrobek za těchto podmínek měl stále stejnou kvalitu, jakost a další předem stanovené požadavky. Optimalizace řezných podmínek představuje v současnosti jeden z nejslabších článků technické přípravy výroby. [18]

Teorie obrábění se od samého počátku vzniku pojmu obrábění zabývá tvorbou třísky především u kovů a jejich slitin. Tvorba třísky je složitý proces, který probíhá v soustavě stroj, nástroj, obrobek a přípravek a v menší nebo větší míře jej ovlivňují. Celý tento děj nazýváme řezný proces. Snahou a celosvětovým trendem je tento řezný proces optimalizovat.

Veliký pokrok ve strojírenství byl zaznamenán v oblasti konstrukce a výroby obráběcích strojů. Stroje mají mechatronické znaky, výroba se stala nesmírně technicky i investičně náročnou. Veliký pokrok byl zaznamenán při nástupu vysokorychlostních obráběcích CNC strojů, které vyvolaly generační změny v celé široké oblasti výrobních strojů. S příchodem těchto obráběcích center se několikanásobně zvýšil výkon i produktivita výroby. Jednou z nejdůležitější části technologické přípravy výroby, na které přímo závisí zejména časový a kvalitativní faktor výroby na CNC obráběcích strojích je rychlá příprava bezchybných NC řídicích programů.

V současné době je zaznamenán velký pokrok i v oblasti konstrukce a materiálu nástroje. V tomto případě se jedná o široké uplatnění vyměnitelných břitových destiček a břitových bloků.

Vývoj v oblasti výrobní techniky, řezných materiálů, je většinou hodnocen z hlediska vlivu na produktivitu a efektivitu práce. V našem případě se bude jednat především o maximální využití výkonu stroje a nástrojů s minimálními náklady a maximálním ziskem. [15]

V praxi bývají navrženy řezné podmínky na základě dlouholetých praktických zkušeností nebo z katalogů řezných nástrojů. Volba řezných parametrů na základě zkušeností nebo podle doporučených hodnot dle výrobce řezných nástrojů nemusí být

vždy optimální. Optimalizace procesu obrábění je v dnešní době jedna z největších nákladových úspor na strojní a nástrojové vybavení, čímž roste rentabilita a efektivita výroby.

Význam optimalizace řezných podmínek a trvanlivosti nástrojů roste zároveň s rostoucími požadavky na komplexní optimalizaci pracovních podmínek, zejména s vazbou na optimalizaci geometrie a materiálu nástroje, výměnu nástrojů při nasazení více nástrojů při práci současně, předávání součástí mezi sklíčidly dvouvřetenového soustruhu, práci na dvou vřetenech současně apod. Tyto optimalizační vazby jsou velmi složité a lze je řešit pouze na počítači při použití vhodných optimalizačních algoritmů.

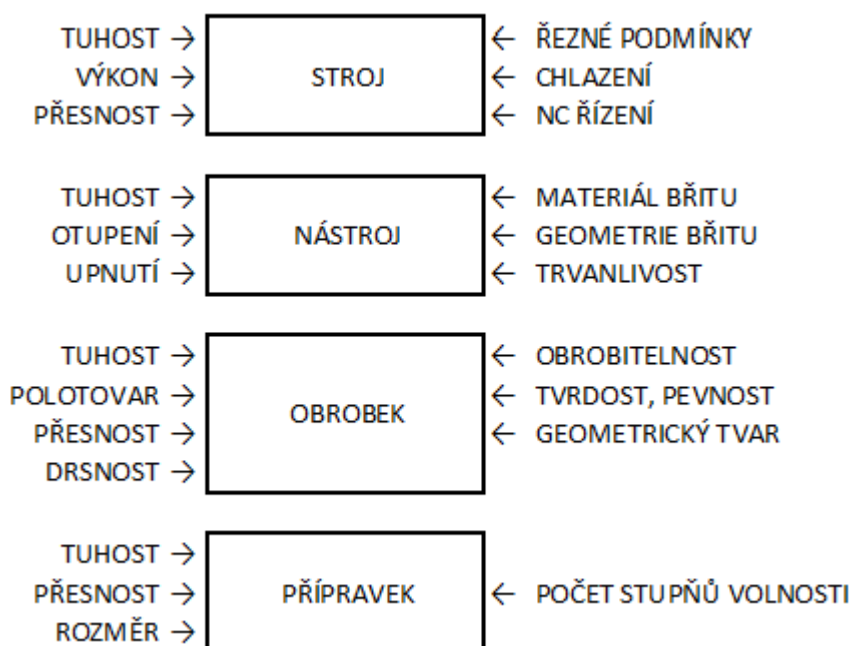
V následujících kapitolách budou podrobně rozebrány všechny parametry, které s optimalizací řezných podmínek souvisí a které optimalizaci omezují. Součástí diplomové práce je návrh optimalizačního softwaru v softwaru Microsoft Excel, který na základě vstupních parametrů a zadaných omezujících kritérií určí a vyhodnotí optimální oblast řezných podmínek.

2 Optimalizace řezných podmínek

Optimalizace řezných podmínek spočívá na rozsahu znalostí fyzikálních, technických a ekonomických vztahů pro danou metodu obrábění. V případě obrábění mohou být tyto vztahy aproximovány odpovídajícími funkcemi. Komplexní, úplná optimalizace řezných podmínek se zakládá z matematického hlediska na řešení systému rovnic, předepisujících vzájemné vztahy jednotlivých kritérií a řezných podmínek. Při komplexní optimalizaci nestačí pouze znalosti nástrojového a obráběného materiálu a údaje o obráběcím stroji, ale je třeba znát řadu dalších hodnot, které mají vliv na komplexní výrobní proces. Dosavadní stav znalostí v oblasti technologie obrábění však nedává dostatek údajů pro praktické aplikace metody komplexní optimalizace. Proto se v praxi užívá částečná optimalizace, která předpokládá menší rozsah údajů pro určení optimálních řezných podmínek s ohledem na přijatá kriteria optimalizace.

Při návrhu řezných podmínek pro danou konkrétní operaci vzniká otázka, jak účelně volit hodnoty jednotlivých řezných podmínek. Jedná se o základní úvahu, zda je účelné zvýšit hloubku řezu na úkor posuvu, zda je lepší pracovat s velkým průřezem třísky a malou řeznou rychlostí nebo s vysokou řeznou rychlostí na úkor posuvu a hloubky řezu. [2]

Řezné podmínky mohou být ovlivněny v širším smyslu obráběcím strojem, nástrojem, obrobkem a přípravkem a v užším smyslu řeznou rychlostí, posuvem a hloubkou řezu. Technolog musí mít na paměti, že existují vlivy, působící na jednotlivé prvky soustavy stroj, nástroj, obrobek a přípravek (obr. 2.1). [2]



Obr. 2.1 Vlivy působící na soustavu stroj, nástroj, obrobek a přípravek.

2.1 Předpoklady pro určení optimálních řezných podmínek

Předpokladem pro určení optimálních řezných podmínek pro jednotlivé metody obrábění je matematické vyjádření vzájemných vztahů řezných podmínek a omezujících podmínek. Za současného stavu znalostí se tyto vztahy určují experimentálně, nejsou zcela obecně platné, lze je využít jen v rozsahu podmínek provedených experimentů, i když se často interpolací rozsah použití zvětšuje.

Současným stavem a přetrvávající představou většiny podniků a jejich vedení je, že technolog a obráběč musí znát problematiku stanovení optimálních řezných podmínek. Tato úvaha není správná, jelikož optimalizační vazby jsou velmi složité a lze je řešit pouze na počítači při použití vhodných optimalizačních algoritmů. Technologové a obráběči by měli bezpodmínečně znát postup při stanovení optimálních řezných podmínek.

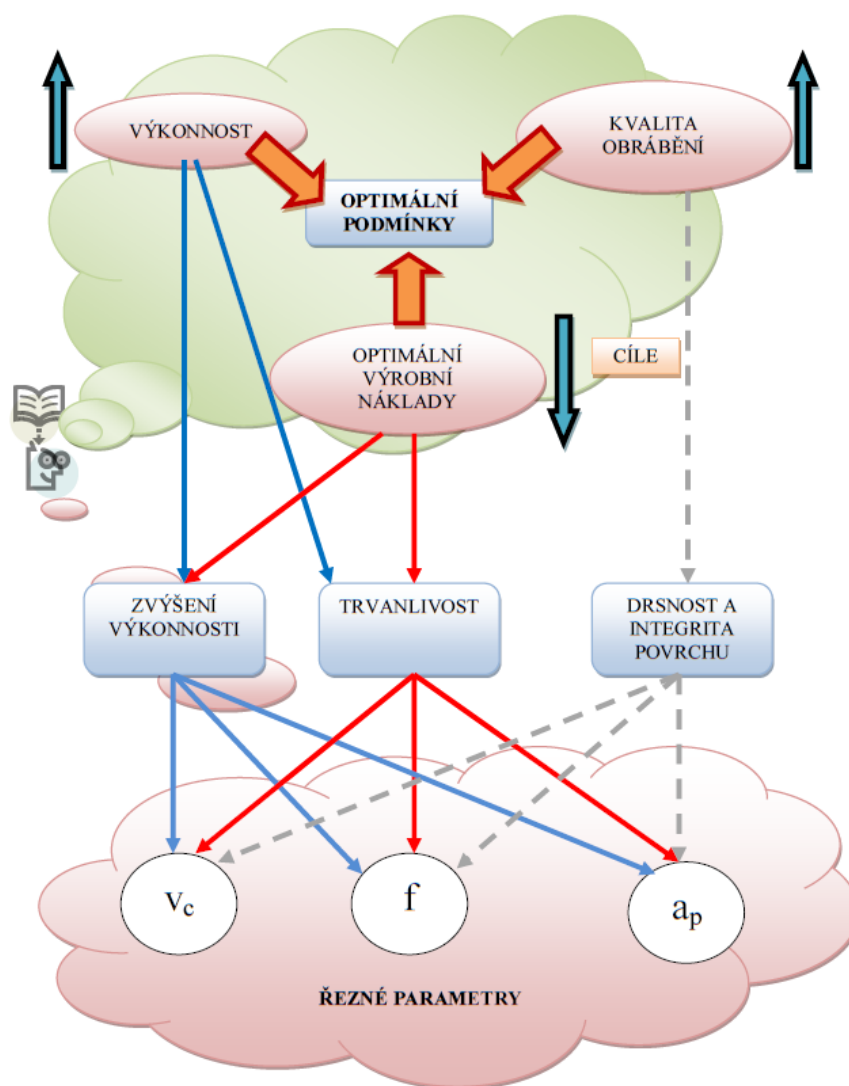
V praxi se objevují technologové, kteří umí programovat a pracovat s CAM systémy. CAM systémů je dneska nepřeberné množství. Rozdíly v jejich uživatelském rozhraní a možných metodách obrábění se v menší nebo větší míře liší. Výrobci CAM systémů programátory zaškolí, ale nenaučí je tyto systémy a následně jejich aplikaci do stroje využít s maximálním využitím jak programu, tak obráběcího stroje a moderních progresivních nástrojů. Technolog a obráběč by se v tomto směru měli neustále vzdělávat.

2.2 Zásady pro volbu optimálních řezných podmínek

Optimální řezné podmínky volíme podle těchto zásad:

- řezné podmínky musí zaručit dodržení požadavků na výrobek, uvedených na výrobním výkrese (rozměrová přesnost, jakost a integrita povrchu),
- řezné podmínky musí odpovídat technickým parametrům obráběcího stroje nebo obráběcího centra (otáčky vřetene, posuvy, výkon pohonného elektromotoru, krouticí moment),
- maximální úběr materiálu musí být dosažen co nejhospodárněji,
- průřez odebírané třísky musí odpovídat tuhosti soustavy stroj, nástroj, obrobek a přípravek, měl by být konstantní a čtvercový. [3]

Zásady při volbě optimálních řezných podmínek jsou schematicky znázorněny na obr. 2.2.



Obr. 2.2 Postupné schéma zásad při volbě optimálních řezných podmínek

Postup volby optimálních řezných podmínek se liší podle toho, jestli se jedná o operace:

- a) hrubovací,
- b) načisto.

Při volbě optimálních řezných podmínek při obrábění můžeme postupovat těmito způsoby:

a) Výpočtem ze známých závislostí.

Vypočte se optimální trvanlivost T a určí se hloubka řezu a_p a posuv f . Z těchto hodnot se pak vypočte řezná rychlost v_c , odpovídající optimální trvanlivosti T . Lze postupovat pomocí běžných početních prostředků. Jednodušším postupem je však sestavení programu a výpočet optimálních řezných podmínek řešit pomocí počítače. Program by měl obsahovat všechny opravné koeficienty pro různé vlastnosti nástrojů i obráběných materiálů. Vstupní data se zapisují do předepsaných formulářů. Výpočet se tak velmi zrychluje.

b) Volbou tzv. normativů řezných podmínek.

V normativech jsou tabelárně uspořádány hodnoty řezných podmínek v kombinacích odpovídajících vždy uvedené trvanlivosti. Pro snížení počtu tabulek jsou obráběné materiály rozděleny do tříd obrobitelnosti. Jakost a integrita povrchu, opotřebení nástroje a některé další parametry jsou zahrnuty pomocí opravných koeficientů.

2.2.1 Volba optimálních řezných podmínek při hrubování

Při hrubování, kdy odebíráme třísku větších průřezů, volíme v první řadě hloubku odřezávané vrstvy. Ve většině případů je tato hloubka dána přídatkem na obrábění. K rozdělení přídatku na obrábění na více třísek přikročíme pouze tehdy, není-li tuhost soustavy dostatečná nebo nestačí-li výkon pohonu stroje. Stejně volíme posuv co největší, ale takový, jaký dovoluje tuhost soustavy a výkon stroje. Proto je nutné znát parametry obráběcího stroje nebo obráběcího centra.

Maximální možné hodnoty řezných podmínek není možno v praxi zcela realizovat. V konkrétních případech je třeba dodržet a ustoupit řadě různých omezení, které jsou určeny:

- obráběcím strojem - rozsahem a počtem stupňů otáček pracovního vřetena,
- rozsahem a počtem stupňů posuvů,

- maximálním užitečným výkonem elektromotoru a maximálním krouticím momentem,
- tuhostí a pevností částí obráběcího stroje a upínacího zařízení,
- řezným nástrojem - řezivostí materiálem bříty nástroje,
- pevností nástroje a jeho jednotlivých částí,
- tuhostí nástroje,
- obrobkem - obrobiteľností materiálu, chemickým složením, pevnostními parametry,
- tuhostí obrobku,
- kvalitativními požadavky (přesnost rozměru, přesnost tvaru, drsnost obrobeného povrchu). [16]

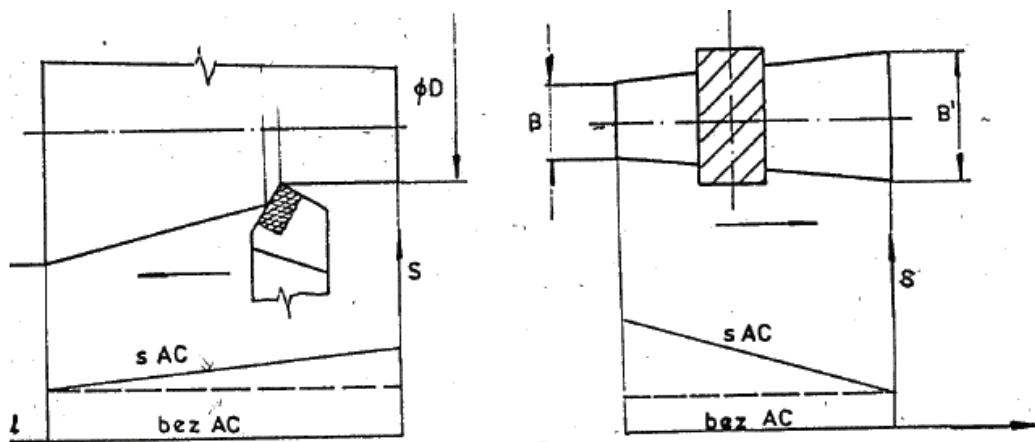
Jakým způsobem omezuje obráběcí stroj nebo obráběcí centrum průřez třísky bude pojednáno v kap. 4.

2.2.2 Volba optimálních řezných podmínek při obrábění načisto

Při obrábění načisto většinou není třeba brát v úvahu výkon elektromotoru a tuhost obráběcího stroje. Průřez třísky je malý. Kritériem volby řezných podmínek je přesnost obrobku a drsnost obrobené plochy a integrita obrobeného povrchu. Hloubka odřezávané vrstvy je známá a je dána přídatkem na obrábění, který zůstal po hrubování. Posuv je omezen pouze požadovanou drsností a integritou povrchu, protože by bylo obtížné vázat jej na přesnost obrábění. Přesný výpočet pro určení posuvu z hlediska požadované drsnosti a integrity povrchu neexistuje. Vycházíme-li při výpočtu z tvaru stopy, kterou zanechává na obrobené ploše břit, je vypočtená drsnost 2,5 až 7 krát menší než drsnost skutečná (projevuje se zde vliv primárních plastických deformací, tvorba nárůstku apod.). Z těchto důvodů používáme experimentálně odvozených vzorců nebo hodnot tabulkových. [15]

3 Rozdělení optimalizace

Optimalizaci řezných podmínek můžeme rozdělit z časového hlediska na konvenční, kdy optimalizujeme řezné podmínky před vlastním obráběním (univerzální stroje, NC stroje a stroje bez adaptivního řízení) a adaptivní, u kterého dochází k optimalizaci v průběhu obrábění (stroje s adaptivním řízením). Porovnání dráhy nástroje u stroje konvenčního a s adaptivním řízením je zobrazeno na obr. 3.1. Z obrázku je patrné, že dráhy nástroje jsou s adaptivním řízením optimalizovány, nástroj má kratší trajektorii. [18]



Obr. 3.1 Porovnání dráhy nástroje u stroje bez adaptivního řízení a s adaptivním řízením. [14]

Dále rozdělujeme optimalizaci:

- podle optimalizačního kritéria (kritérium optimálnosti z hlediska výrobních nákladů, produktivity, zisku a úběru materiálu),
- v rámci omezujících podmínek daných výrobními podmínkami (výkon, krouticí moment, posuv, řezivost nástroje atd.). [15]

3.1 Konvenční optimalizace

V procesu obrábění dochází nejčastěji k postupnému záběru jednotlivých nástrojů bez překrývání jejich práce, což oprostuje od úvah další vazby na tuto práci.

Kritéria optimálnosti při práci jedním nástrojem jsou různá, ale z praktického hlediska jsou významná pouze dvě:

- kritérium minimálních výrobních nákladů,
- kritérium maximální produktivity.

3.1.1 Kritérium minimálních výrobních nákladů

Toto kritérium lze jednoduše matematicky formulovat:

$$VN_u = \min, \quad (3.1)$$

VN_u jsou výrobní náklady na uvažovaný operační úsek v **Kč** (uvažovány jsou pouze náklady, plynoucí ze strojního času t_{As} a času na výměnu, resp. seřízení opotřebeného nástroje t_{vn} , náklady na vedlejší práci a seřízení stroje optimalizací řezných podmínek neovlivní). [1]

Z hlediska těchto dvou časů lze náklady VN_u rozepsat:

$$VN_u = N_{sn} + N_{vn} \cdot [1] \quad (3.2)$$

Položky N_{sn} lze vyjádřit při jednostrojové obsluze a obrábění jednoho kusu jako náklady obsahující následující položky:

- náklady na mzdu dělníka (operátora),
- náklady na provoz stroje,
- náklady na nástroje,
- dílenské režijní náklady. [1]

Vyjádření rovnice:

$$N_{sn} = N_s + N_n = t_{As} \cdot \left[k_C \cdot \frac{M_o}{60} \cdot \left(1 + \frac{VR_d}{100} \right) + \frac{N_{hs}}{60} \right] + z_v \cdot N_{nT},$$

$$N_{sn} = t_{As} \cdot N_{sn} + z_v \cdot N_{nT} \cdot [1] \quad (3.3)$$

Z předchozího vztahu vyplývá, že výrobní režijní náklady se připočítávají ke mzdám výrobních dělníků. Tuto skutečnost je nutné respektovat při určování výrobní režie. Jakékoliv změny v provozu, které vyvolají změnu režie, se projeví i při optimalizaci řezných podmínek (např. počet výrobních dělníků - při vícestrojové obsluze vzrůstá hodnota výrobní režie). [1]

Hodinové náklady na provoz stroje N_{hs} lze vyjádřit takto:

$$N_{hs} = O_s \cdot k_{us} + C_E, \quad (3.4)$$

$$O_s = \frac{C_s}{Z_s \cdot F_c \cdot S_m \cdot \eta_s} \cdot [1] \quad (3.5)$$

Koeficient časového využití stroje se stanovuje z dlouhodobého průměru, eventuálně z předpokladu o vytížení stroje. Pro různé typy výrob plynou z využití času v různých závodech přibližné hodnoty koeficientu (3.5), který je dán

podílem součtu ceny stroje, předpokládané částky za opravy, resp. údržby (po dobu jeho životnosti), směnnosti a účinnosti stroje. [1]

Počet výměn z_v při obrábění jedné součásti lze vyjádřit:

$$z_v = \frac{t_{As}}{T} \cdot \tau. [1] \quad (3.6)$$

Náklady na nástroje, vztažené na jednu trvanlivost N_{nT} , lze též vyjádřit i pro nástroje s vyměnitelnými břitovými destičkami, které se zpravidla nepřeostřují:

$$N_{nT} = \frac{c_d \cdot z_d}{z_b \cdot s_b} + (1 + k_{ut}) \cdot \frac{c_{tn}}{z_u}. [1] \quad (3.7)$$

Koeficient údržby tělesa nástroje k_{ut} zahrnuje vlastní údržbu tělesa nástroje a především cenu náhradních dílů - utvářečů třísek, podložek, šroubů apod. Stanoví se jako podíl sumy předpokládané ceny oprav všech náhradních dílů za dobu životnosti tělesa a ceny tělesa nástroje. [1]

Součinitel využití břitových destiček s_b zahrnuje vliv poškození břitů (které právě neřežou) odcházející třískou, křehkým lomem apod. Počet možných výměn břitových destiček je taky omezen se zřetelem na poškození tělesa nástroje v provozních podmínkách. Střední hodnoty z_u , k_{ut} , s_b zjištěné v provozních podmínkách jsou uvedeny v tabulce č. 3. 1. [1]

Pro vyšetřované technologické prostředí (výroba či renovace rotačních ploch kovacích zápusťek v obrobně kovárny) lze provozní podmínky klasifikovat dle následující tabulky jako těžké, čímž se určí potřebné nákladové koeficienty. [1]

Tab. č. 3.1 – Provozní podmínky při obrábění. [1]

Provozní podmínky při obrábění	z_u	s_b	k_{ut}
lehké	400 až 600	0,95	0,05
střední	200 až 400	0,90	0,25
těžké	200	0,80	0,40
velmi těžké	100	0,70	0,60

Vzhledem k vysokým cenám břitových destiček a celosvětovému vývoji cen některých surovin pro jejich výrobu se vyměnitelné břitové destičky ze slinutých karbidů, u kterých to umožňuje jejich geometrie, přeastřují. [1]

Náklady N_{vn} obsahují:

- náklady na mzdu seřizovače,
- náklady na provoz stroje,
- dílenské režijní náklady. [1]

Vyjádřeno rovnicí:

$$N_{vn} = t_{vn} \cdot \left[k_c \cdot \frac{M_s}{60} \cdot \left(1 + \frac{VR_d}{100} \right) + \frac{O_s}{60} \right] \cdot z_v = t_{vn} \cdot N_{vnm} \cdot z_v. [1] \quad (3.8)$$

Dosazením předchozích vztahů do podmínky (3.1) se obdrží kritérium optimálnosti z hlediska minimálních výrobních nákladů ve tvaru

$$VN_u = t_z \cdot N_{sn} + \frac{t_{As}}{T} \cdot \tau \cdot (t_{vn} \cdot N_{vnm} + N_{nT}) = \min. [1] \quad (3.9)$$

Vzhledem k tomu, že určení optimálních řezných podmínek nelze obecně oddělit od určení trvanlivosti nástroje, je vhodné vyjádřit vztah (3.9) jako funkci řezných podmínek - posuvu f , tloušťky odřezávané vrstvy a_p , řezné rychlosti v_c , resp. trvanlivosti T (tedy veličin, které se optimalizují). [1]

Strojní čas lze vyjádřit

$$t_{As} = \frac{L}{n \cdot f}. [1] \quad (3.10)$$

Po dosazení za t_{As} ze vztahu (3.10) do rovnice (3.9) obdržíme

$$VN_u = \frac{L}{n \cdot f} \cdot N_{sn} + \frac{L \cdot \tau}{n \cdot f \cdot T} \cdot (t_{vn} \cdot N_{vnm} + N_{nT}) = \min. [1] \quad (3.11)$$

Po sloučení konstant vztahu (3.11) do konstant K_1 , K_2 , se obdrží kritérium optimálnosti ve tvaru:

$$\frac{K_1}{n \cdot f} + \frac{K_2}{n \cdot f \cdot T} = \min, \quad (3.12)$$

$$\text{kde} \quad K_1 = L \cdot N_{sm} \quad (3.13)$$

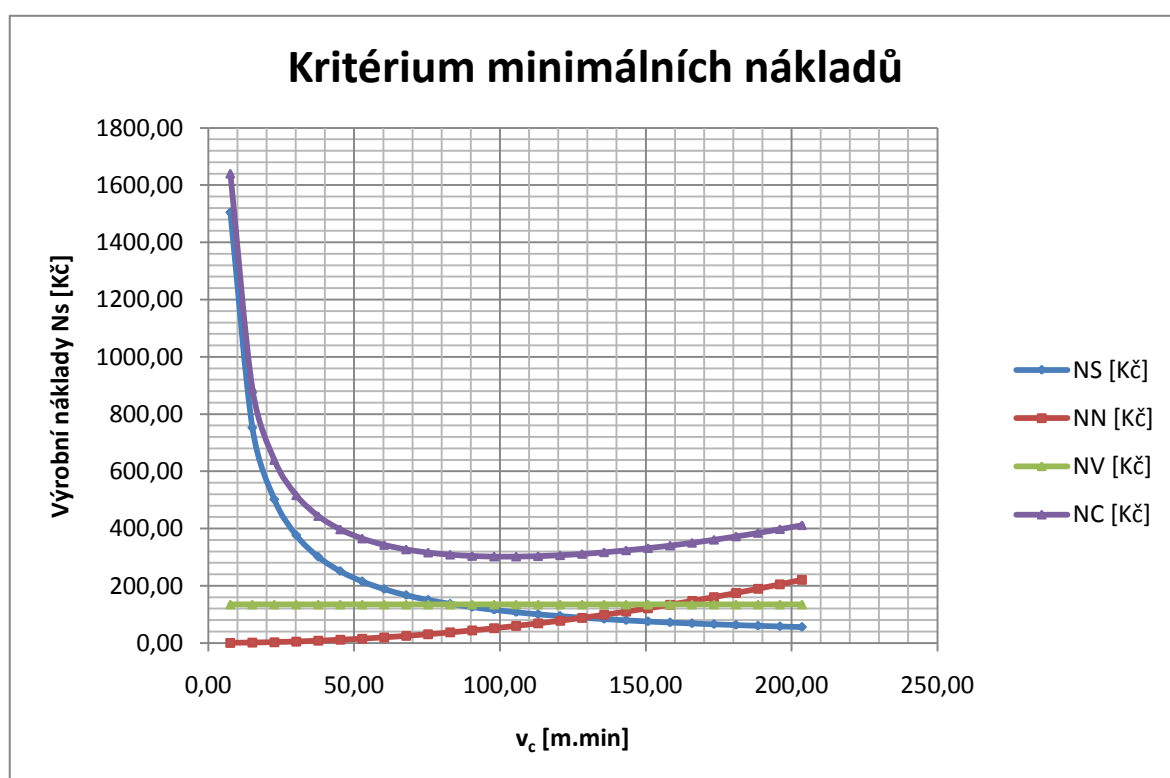
$$\text{a} \quad K_2 = L \cdot \tau \cdot (t_{vn} \cdot N_{vnm} + N_{nT}). [1] \quad (3.14)$$

Snahou je z rovnice pro určení výrobních nákladů (3.1) vyjádřit extrém této funkce a tuto funkci vyjádřit jako funkci T . Optimální trvanlivost nástroje z hlediska minimálních výrobních nákladů bude popsána v kapitole 5.3.

Pro sestrojení grafu kritéria minimálních výrobních nákladů (obr. 3.2) je nutné sestavit tabulku výpočtů (tab. 3.2). Pro výpočet bylo použito praktické zadání. Výpočet a zadané hodnoty jsou uvedeny v příloze A.

Tab. č. 3.2 - Tabulka výpočtu optimalizace dle kritéria minimálních výrobních nákladů.

n [ot ⁻¹]	v_c [m.min]	T [min]	t_{AS} [min]	Q_T	N_S [Kč]	N_N [Kč]	N_V [Kč]	N_C [Kč]
250	75,40	12,21	5,02	2,501	150,48	30,29	135	315,77
275	82,94	9,18	4,56	2,067	136,80	36,65	135	308,45
300	90,48	7,07	4,18	1,736	125,40	43,61	135	304,01
325	98,02	5,56	3,86	1,480	115,75	51,18	135	301,94
350	105,56	4,45	3,58	1,276	107,49	59,36	135	301,85
375	113,10	3,62	3,34	1,111	100,32	68,15	135	303,47
400	120,64	2,98	3,14	0,977	94,05	77,53	135	306,58
425	128,18	2,49	2,95	0,865	88,52	87,53	135	311,05
450	135,72	2,09	2,79	0,772	83,60	98,13	135	316,73
475	143,26	1,78	2,64	0,693	79,20	109,34	135	323,54
500	150,80	1,53	2,51	0,625	75,24	121,15	135	331,39



Obr. 3.2 Graf kritéria minimálních nákladů

3.1.2 Kritérium maximální produktivity

Jedná se o maximální počet vyráběných součástí za jednotku času, resp. minimální jednotkový čas, který je druhým nejdůležitějším optimálním kritériem. Používá se všude tam, kde jsme omezeni kapacitou výrobního zařízení, resp. daným

termínem dohotovení určitého počtu součástí. V případě konkrétního termínu neplánované zakázky je možné kombinovat kritérium maximální produktivity s kritériem minimálních výrobních nákladů tak, aby náklady na obrábění byly minimální a současně, aby byl dodržen termín dohotovení zakázky.

Kritérium maximální produktivity lze vyjádřit při uvažování určitého operačního úseku ve tvaru

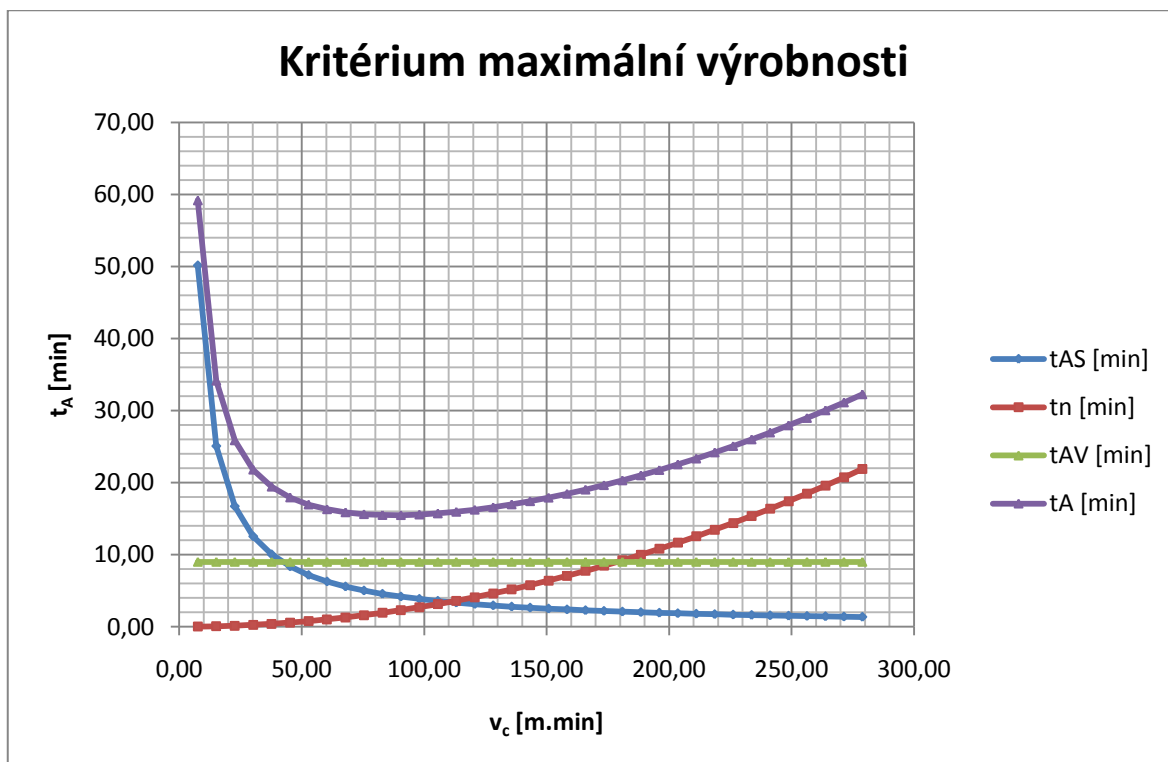
$$t_u = t_s + t_{vn} \cdot z_v = \min. [1] \quad (3.15)$$

Z matematického hlediska jsou kritéria optimálnosti minimálních výrobních nákladů a maximální produktivity stejná. Tato skutečnost umožňuje řešit optimalizaci řezných podmínek.

Pro sestrojení grafu kritéria minimálních výrobních nákladů (obr. 3.3) je nutné sestavit tabulku výpočtů (tab. 3.3). Pro výpočet bylo použito praktické zadání. Výpočet a zadané hodnoty jsou uvedeny v příloze A.

Tab. č. 3.3 - Tabulka výpočtu optimalizace dle kritéria maximální výrobnosti.

n [ot ⁻¹]	v_c [m.min]	T [min]	Q_T	t_{AS} [min]	t_n [min]	t_{AV} [min]	t_A [min]
200	60,32	23,85	3,91	6,27	1,02	9,00	16,29
225	67,86	16,75	3,09	5,57	1,30	9,00	15,87
250	75,40	12,21	2,50	5,02	1,60	9,00	15,62
275	82,94	9,18	2,07	4,56	1,94	9,00	15,50
300	90,48	7,07	1,74	4,18	2,30	9,00	15,48
325	98,02	5,56	1,48	3,86	2,70	9,00	15,56
350	105,56	4,45	1,28	3,58	3,14	9,00	15,72
375	113,10	3,62	1,11	3,34	3,60	9,00	15,94
400	120,64	2,98	0,98	3,14	4,10	9,00	16,23
425	128,18	2,49	0,87	2,95	4,62	9,00	16,57
450	135,72	2,09	0,77	2,79	5,18	9,00	16,97



Obr. 3.3 Graf kritéria maximální výrobnosti

3.1.3 Vícekriteriální optimalizace

V technologii obrábění mohou nastat i případy, kdy je požadován určitý kompromis mezi optimalizací z hlediska minimálních výrobních nákladů VN_u a maximální produktivity t_u . Pak je nutné vzít v úvahu vícekriteriální hodnocení s kritériem K_v :

$$K_v = r \cdot \frac{VN_u}{VN_u^l} + (1 - r) \cdot \frac{t_u}{t_u^l} = \min, 0 \leq r \leq 1. \quad [1] \quad (3.16)$$

Po dosazení za VN_u a t_u a po úpravě (3.16) obdržíme kritérium ve tvaru

$$\frac{1}{n \cdot f} \cdot \left[K_1 \cdot \frac{r}{VN_u^l} + \frac{K_3 \cdot (1-r)}{t_u^l} \right] + \frac{1}{n \cdot f \cdot T} \cdot \left[K_2 \cdot \frac{r}{VN_u^l} + \frac{K_4 \cdot (1-r)}{t_u^l} \right] = \min. \quad [1] \quad (3.17)$$

3.1.4 Kritérium maximálního zisku

Kritérium maximálního zisku je čistě z hlediska optimalizace řezných podmínek shodné s kritériem minimálních výrobních nákladů. Jestliže však přihlídneme k zákonitostem tržního prostředí, může docházet k určitým rozdílům. [1]

3.1.5 Kritérium maximálního úběru

Shodnost s kritériem maximální produktivity je pouze v případě, kdy se vychází předem z optimální trvanlivosti řezného nástroje z hlediska maximální produktivity. Vzhledem k tomu, že je tuto optimální trvanlivost možno určit před optimalizací řezných podmínek pouze za určitých okolností (obecně nelze oddělit optimalizaci trvanlivosti a řezných podmínek), je použití tohoto kritéria jako kritéria maximální produktivity obecně nesprávné. [1]

Matematicky se dá kritérium maximálního úběru vyjádřit vztahem:

$$U = v_c \cdot f \cdot a_p \cdot [1] \quad (3.18)$$

3.2 Adaptivní optimalizace

Úkolem adaptivní optimalizace je okamžité stanovení podmínek obrábění vycházejícího ze skutečných okamžitých informací o průběhu a stavu obrábění. Tyto údaje jsou v adaptivním systému dodávány průběžně po celou dobu obrábění.

Adaptivní optimalizace obráběcích strojů a obráběcích center musí eliminovat nežádoucí poruchové veličiny, čímž dochází k zabezpečení optimálnosti v oblasti obrábění a řezných podmínek. Mezi poruchové veličiny řadíme:

- obrobitelnost materiálu obrobku,
- otupení obráběcího nástroje,
- hloubku řezu,
- předepsaný rozměr obrobené plochy
- drsnost obrobené plochy a integritu obrobku.

3.2.1 Výhody adaptivní optimalizace

Mezi výhody adaptivní optimalizace řadíme:

- dokonalejší způsob optimalizace řezných podmínek,
- zmenšení nebezpečí vylomení bříty nástroje,
- okamžité zastavení obráběcího stroje při přetížení,
- rozměrová kompenzace otupení bříty obráběcího nástroje – korekce nástroje,
- snížení nároků na podklady nutné k optimalizování,
- snížení zmetkovitosti,
- optimální využití systému stroj, nástroj, obrobek a přípravek,
- automatické rozdělení řezu.

4 Omezení v optimalizaci řezných parametrů

Jedná se o technická omezení vyskytující se při optimalizaci řezných podmínek, které se formulují ve formě omezujících podmínek. Technologické prostředí procesu obrábění charakterizuje určitý soubor omezujících podmínek, a proto je nezbytné vždy zvážit, které omezující podmínky přicházejí pro danou technologii v úvahu a které bychom mohli alespoň částečně eliminovat. Čím větší počet různých omezení bude nutné při určování optimálních řezných podmínek respektovat, tím složitější bude proces optimalizace.

Omezující podmínky jsou obecně nerovnice, pouze výjimečně mohou být rovnicemi.

4.1 Omezení dané výkonem obráběcího stroje

Omezení dané výkonem obráběcího stroje je nejdůležitějším omezením při hrubování. Omezující podmínku lze formulovat:

$$P_{\text{řez}} \leq P_{\text{euž}} = P_e \cdot \eta \cdot [1] \quad (4.1)$$

Výkon potřebný pro řezání $P_{\text{řez}}$ je nutné vyjádřit jako funkci řezných podmínek.

Pak platí

$$60 \cdot P_{\text{řez}} = F_c \cdot v_c \cdot [1] \quad (4.2)$$

Pro soustružení platí

$$F_c = c_c \cdot a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \cdot v_c^{z_{Fc}}, \quad (4.3)$$

kde c_c je konstanta a x_{Fc} , y_{Fc} , z_{Fc} jsou exponenty. [1]

Po dosazení z rovnice (4.3) do omezující podmínky (4.1) platí

$$c_c \cdot a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \cdot v_c^{z_{Fc}+1} \leq 60 \cdot P_e \cdot \eta \cdot [1] \quad (4.4)$$

Dosazením za v_c se po úpravě obdrží omezující podmínka z hlediska výkonu obráběcího stroje ve tvaru

$$a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \cdot n^{z_{Fc}+1} \leq \frac{60 \cdot P_e \cdot \eta}{c_c} \cdot \left(\frac{1000}{\pi \cdot D} \right)^{z_{Fc}+1} \cdot [1] \quad (4.5)$$

Vzhledem k tomu, že závislost řezné složky je na řezné rychlosti poměrně slabá (z_{Fc} se blíží 0), obecně nemonotónní, i vzhledem k tomu, že pro určitý řezný

materiál přichází v úvahu jen omezený rozsah řezné rychlosti, uvažuje se většinou rovnice (4.3) ve tvaru

$$F_c = c_c \cdot a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \quad (4.6)$$

a omezující podmínka (4.5) ve tvaru

$$a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \cdot n \leq \frac{60 \cdot 10^3 \cdot P_e \cdot \eta}{\pi \cdot c_c \cdot D} \cdot [1] \quad (4.7)$$

Analogicky lze vyjádřit omezující podmínku z hlediska výkonu i pro jiné technologie obrábění.

4.2 Omezení dané maximálně přípustným krouticím momentem

Z hlediska upínacího zařízení stroje (síly upnutí), eventuálně z jiných důvodů je nutné uvažovat omezení dané maximálně přípustným krouticím momentem $M_{k,max}$, kdy

$$M_k \leq M_{k,max} \cdot [1] \quad (4.8)$$

Krouticí moment lze vyjádřit vztahem

$$M_k = \frac{F_c \cdot D(n)}{2} \cdot [1] \quad (4.9)$$

Dosazením za M_k z rovnice (4.9) do podmínky (4.8) a dále za F_c z rovnice (4.6) po úpravě pro soustružení platí omezující podmínka

$$a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \leq \frac{2 \cdot M_k}{c_c \cdot D} \cdot [1] \quad (4.10)$$

4.3 Omezení dané maximální přípustnou silou řezání

S ohledem na pevnost řezného nástroje nebo obrobku je nutné uvažovat omezující podmínku z hlediska maximálně přípustného řezného odporu R , resp. výsledné síly obrábění F .

Přestože lze uvažovat působení všech složek síly obrábění, vzhledem ke zkoumanému technologickému prostředí je vhodné a také jednodušší uvažovat pouze namáhání řeznou složkou síly obrábění a dovolené namáhání σ_d uvažovat se zřetelem na toto zjednodušení s určitou bezpečností.

$$F_c \leq F_{c,max} \cdot [1] \quad (4.11)$$

Po dosazení za F_c z rovnice (4.6) lze po úpravě obdržet omezující podmínku ve tvaru

$$a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \leq \frac{F_{c,max}}{c_c \cdot F_c} \cdot [1] \quad (4.12)$$

Omezující podmínku z hlediska maximálně přípustné výsledné síly obrábění je někdy vhodné uvažovat v zjednodušeném tvaru

$$f_c \leq f_{Fmax} \cdot [1] \quad (4.13)$$

Uvažovaná omezující podmínka má praktické uplatnění zejména z hlediska křehkých lomů břitu (vylamování ostří), resp. celkové destrukce břitu. Praktické zkušenosti však ukazují, že tyto jevy jsou jen málo závislé na tloušťce odřezávané vrstvy, a proto je použití této omezující podmínky oprávněné. Velikost f_{Fmax} se stanovuje experimentálně nebo přibližně na základě zkušeností s obráběním ve stejných nebo obdobných pracovních podmínkách.

4.4 Omezení dané vhodným utvářením třísky

U technologických operací, kdy sám technologický proces nezajišťuje dělení třísek, je nutné zejména u strojů bez přímého dohledu obsluhy (NC strojů) zabezpečit obrábění v rozsahu řezných podmínek, kde dochází ke vhodnému utváření (dělení) třísek.

Optimalizaci řezných podmínek je vhodné provádět pro určitou tloušťku odřezávané vrstvy a na základě znalostí diagramu vhodného utváření třísek. Omezující podmínky jsou:

$$f \leq f_{u,max}, \quad (4.14)$$

$$f \leq f_{u,min} \cdot [1] \quad (4.15)$$

4.5 Omezení dané požadovanou drsností obrobené plochy

Soustruží-li se načisto, je důležité omezení z hlediska požadované drsnosti obrobené plochy. Toto omezení lze formulovat ve tvaru

$$R_a \leq R_{a,max} \cdot [1] \quad (4.16)$$

Obecně platí, že

$$R_a = f(f, v_c, a_p, r_\epsilon, \kappa_r, \kappa'_r, \dots) \cdot [1] \quad (4.17)$$

4.6 Omezení dané požadovanou přesností obrobené plochy

Toto omezení mající smysl při dokončovacích operacích má kritérium požadované přesnosti obrobené plochy. Neuvažuje-li se nepřesnost vlivem radiálního opotřebení (otupení) nástroje, je nepřesnost způsobena elastickou deformací soustavy stroj - nástroj - obrobek pod působením řezné síly. Obvykle je rozhodující deformace jednoho z členů této soustavy a deformace dalších je možné zanedbat. Při formulaci této podmínky se vychází ze vztahů z pružnosti a z rovnice

$$d \leq d_{max} \cdot [1] \quad (4.18)$$

4.7 Omezení dané minimálními a maximálními otáčkami stroje

Vzhledem k tomu, že je možné nastavení otáček na stroji pouze v určitém rozsahu, platí

$$n \leq n_{s,max}, \quad (4.19)$$

$$n \geq n_{s,min} \cdot [1] \quad (4.20)$$

4.8 Omezení dané minimálním a maximálním posuvem stroje

Jestliže se posuvy na obráběcím stroji nastavují v určitém rozsahu a udávají se za jednu otáčku, pak

$$f \leq f_{s,max}, \quad (4.21)$$

$$f \geq f_{s,min} \cdot [1] \quad (4.22)$$

Pro obráběcí stroje, kde je posuv udáván v $mm \cdot min^{-1}$, platí

$$f \cdot n = f_m \leq f_{s,max}, \quad (4.23)$$

$$f \cdot n = f_m \geq f_{s,min} \cdot [1] \quad (4.24)$$

4.9 Omezení dané komplexním Taylorovým vztahem

Poslední uvedené omezení má v rámci uvedených omezení výjimečné postavení. Omezující podmínka je rovnicí a kromě toho je funkcí trvanlivosti řezného nástroje. Tyto skutečnosti ovlivňují významně matematické řešení úloh optimalizace řezných podmínek. Obrobitelnost obráběného materiálu lze charakterizovat funkčním vztahem mezi proměnnými řezného procesu. Podobně tak i řezivost nástroje a řezné prostředí. [1]

Obrobitelnost, řezivost i dané řezné prostředí spolu úzce souvisí. S ohledem na současnou neschopnost charakterizovat obrobitelnost (resp. řezivost a řezné prostředí) pomocí základních fyzikálních, resp. chemických veličin, je vhodné charakterizovat obrobitelnost materiálu pro optimalizaci řezných podmínek pomocí komplexního Taylorova vztahu, který je současně charakteristikou řezivosti a řezného prostředí. [1]

Pro soustružení má pak komplexní Taylorův vztah tvar

$$v_c = \frac{c_v}{a_p^{x_v} \cdot f^{y_v} \cdot T^{\frac{1}{m}}}. [1] \quad (4.25)$$

Dosazením do rovnice (4.25) se obdrží omezující podmínka ve tvaru

$$a_p^{x_v} \cdot f^{y_v} \cdot n = \frac{10^3 \cdot c_v}{\pi \cdot D \cdot T^{\frac{1}{m}}}. [1] \quad (4.26)$$

Omezující podmínka z hlediska komplexního Taylorova vztahu se může uvažovat spolu s ostatními omezujícími podmínkami nebo ji lze začlenit do kritéria optimálnosti.

4.10 Komplexní omezující podmínka

Obtížně podchytitelné faktory vedou ke snaze sloučit působení těchto faktorů do společných závislostí i za cenu určité nepřesnosti.

4.11 Organizační omezení

Mimo omezení technického charakteru mohou přicházet v úvahu omezení tzv. organizačního charakteru. Při jednonástrojovém obrábění jde o omezení z hlediska omezeného množství speciálních nástrojů, časového rozmezí, ve kterých seřizovač může provádět výměnu nástrojů apod. Matematická formulace je závislá na konkrétních podmínkách.

5 Optimální trvanlivost nástroje

Optimální trvanlivost bříty nástroje je prvním kritériem při určování řezných podmínek. Trvanlivost nástroje určujeme ze základního vztahu $T-v_c$ závislosti. Trvanlivost se dále určuje na základě dvou hlavních hledisek, a to z hlediska maximální výrobnosti a minimálních nákladů. Dále musíme určit omezující podmínky, které musíme do stanovení optimální trvanlivosti komplexně zahrnout.

5.1 Analytické a grafické znázornění $T - v_c$ závislosti

Ze základního vztahu $T-v_c$ závislost lze pro dané zadání získat upravený vztah:

$$T_1 \cdot v_{c1}^m = T_2 \cdot v_{c2}^m, \quad (5.1)$$

po zlogaritmování vztahu (5.1)

$$\log T_1 + m \cdot \log v_{c1} = \log T_2 + m \cdot \log v_{c2} \quad (5.2)$$

a úpravě vztahu (5.2) získáme

$$m = \frac{\log T_1 - \log T_2}{\log v_{c2} - \log v_{c1}}. \quad [4] \quad (5.3)$$

Ze základního vztahu pro $T-v_c$ závislost $v_c = C_v \cdot T^{-\frac{1}{m}}$ vyplývá:

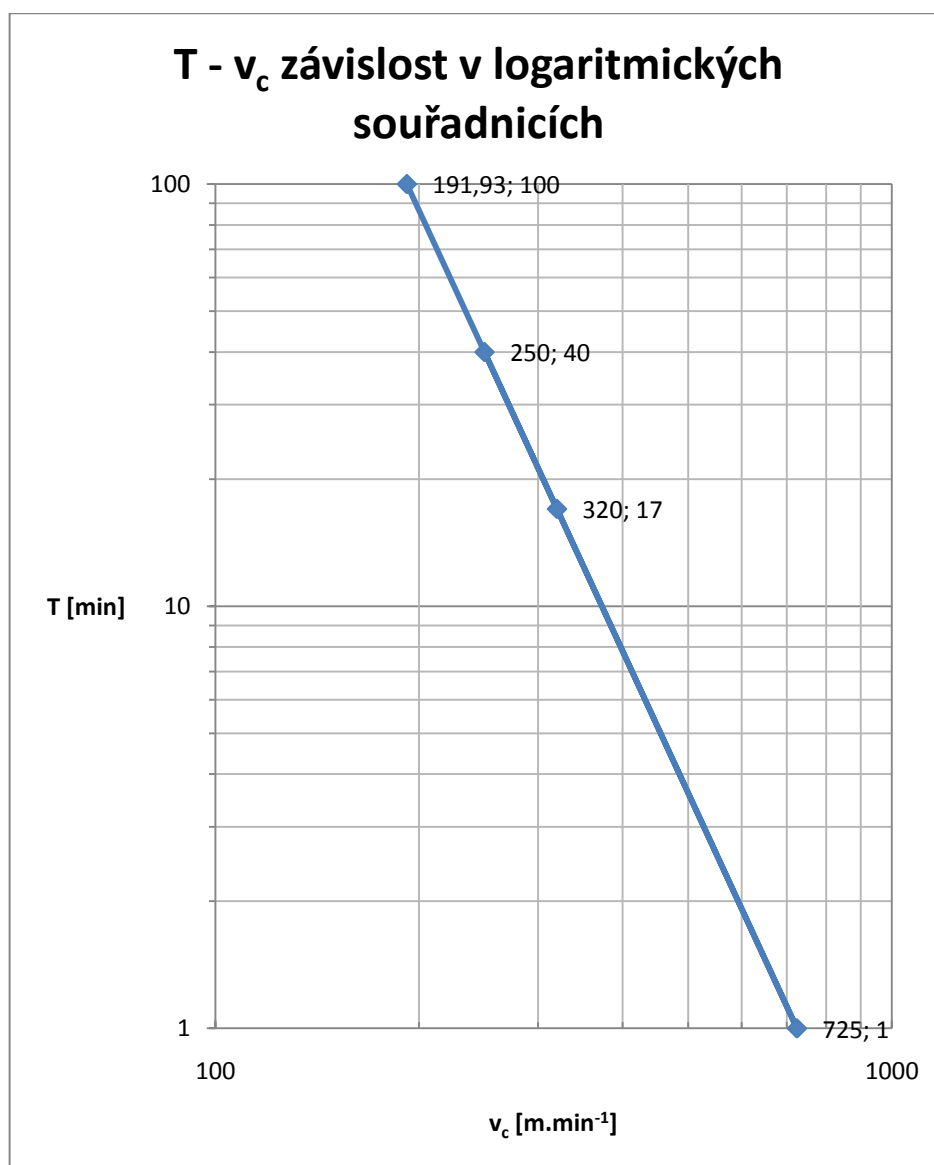
$$C_v = C_v \cdot T^{\frac{1}{m}} = v_{c1} \cdot T_1^{\frac{1}{m}} = v_{c2} \cdot T_2^{\frac{1}{m}}. \quad [4] \quad (5.4)$$

$$\text{Dále platí } C_T = C_v^m. \quad [4] \quad (5.5)$$

Zápis v_{c30} znamená, že se jedná o hodnotu řezné rychlosti pro trvanlivost $T = 30$ min, která se pro dané podmínky stanoví:

$$v_{c30} = C_v \cdot 30^{-\frac{1}{m}}. \quad [4] \quad (5.6)$$

Grafické řešení, vygenerované v softwaru Microsoft Excel, je uvedeno na obr. 5.1. Pro sestavení grafu byly voleny praktické hodnoty. Výpočet a zadané hodnoty jsou uvedeny v příloze A.



Obr. 5.1 T-v_c závislost v logaritmických souřadnicích v softwaru Microsoft Excel

Hodnoty konstant C_v , C_T a exponentu m budou použity pro výpočty optimální trvanlivosti z hlediska minimálních výrobních nákladů a maximální výrobnosti v kapitole 5.2 a 5.3.

5.2 Optimální trvanlivost z hlediska maximální výrobnosti

Operační čas jednotkové práce lze vyjádřit vztahem:

$$t_A = t_{As} + t_{Av} + t_{Ax,c} \text{ [min]}, \quad (5.7)$$

kde:

- t_{As} [min] - jednotkový strojní čas,
- t_{Av} [min] - jednotkový vedlejší čas,
- $t_{Ax,c}$ [min] - celkový čas na výměnu a seřízení nástroje. [4]

Pro případ podélného lze jednotkový strojní čas vypočítat podle vztahu (bez uvažování náběhu a přeběhu nástroje):

$$t_{As} = \frac{q \cdot L}{v_f} = \frac{q \cdot L}{n \cdot f} [\text{min}], \quad (5.8)$$

kde: $v_f [mm \cdot min^{-1}]$ je posuvová rychlost. [4]

Ze vztahu pro výpočet řezné rychlosti při podélném soustružení:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{10^3} [m \cdot min^{-1}], \quad (5.9)$$

lze vypočítat otáčky:

$$n = \frac{10^3 \cdot v_c}{\pi \cdot D} [min^{-1}]. [4] \quad (5.10)$$

Po dosažení $v_c = C_v \cdot T^{-\frac{1}{m}}$ do (5.10):

$$n = \frac{10^3 \cdot C_v \cdot T^{-\frac{1}{m}}}{\pi \cdot D} [min^{-1}]. [4] \quad (5.11)$$

Po dosazení (5.10) do (5.8) a úpravě:

$$t_{As} = \frac{q \cdot L \cdot \pi \cdot D}{10^3 \cdot C_v \cdot T^{-\frac{1}{m}} \cdot f} = \frac{q \cdot L \cdot \pi \cdot D}{10^3 \cdot C_v \cdot f} \cdot T^{\frac{1}{m}} = k_1 \cdot T^{\frac{1}{m}} [\text{min}], \quad (5.12)$$

$$\text{kde: } k_1 = \frac{q \cdot L \cdot \pi \cdot D}{10^3 \cdot C_v \cdot f} \cdot [4] \quad (5.13)$$

Celkový čas na výměnu a seřízení nástroje se vypočítá podle vztahu:

$$t_{Ax,c} = z_v \cdot t_{Ax} [\text{min}], \quad (5.14)$$

kde: $t_{Ax} [\text{min}]$ je čas jedné výměny nástroje,

$z_v [-]$ je počet výměn nástroje pro obrobení q kusů obrobku

a vypočítá se podle vztahu:

$$z_v = \frac{t_{As}}{T} [-], \quad (5.15)$$

kde: $T = 40$ minut je trvanlivost nástroje při daných řezných podmínkách

($v_c = 250 m \cdot min^{-1}$, $f = 0,25$ mm, $ap = 2$ mm). [4]

Použitím vztahu (5.12), (5.14) a (5.15) se získá konečný obecný vztah pro výpočet operačního času jednotkové práce:

$$t_{Ax,c} = z_v \cdot t_{Ax} = \frac{t_{As}}{T} \cdot t_{Ax} = \frac{k_1 \cdot T^{\frac{1}{m}}}{T} \cdot t_{Ax} = k_1 \cdot T^{\left(\frac{1}{m}-1\right)} \cdot t_{Ax} [\text{min}]. [4] \quad (5.16)$$

Dosazením (5.12), (5.16) do (5.7) se získá konečný obecný vztah pro výpočet operačního času jednotkové práce:

$$t_A = k_1 \cdot T^{\frac{1}{m}} + t_{Av} + k_1 \cdot T^{\left(\frac{1}{m}-1\right)} \cdot t_{Ax} [\text{min}]. [4] \quad (5.17)$$

Derivace vztahu (5.16) podle T (t_{AV} závisí na T):

$$\frac{dt_A}{dT} = k_1 \cdot T^{\left(\frac{1}{m}-1\right)} + 0 + k_1 \cdot \left(\frac{1}{m} - 1\right) \cdot T^{\left(\frac{1}{m}-2\right)} \cdot t_{Ax} \cdot [4] \quad (5.18)$$

Po úpravě vztahu (5.18), za předpokladu, že jeho hodnota je rovna nule (podmínka extrému funkce znamená, že hodnota její první derivace je nulová):

$$\frac{k_1}{m} \cdot \frac{T^{\frac{1}{m}}}{T} + \frac{k_1}{m} \cdot (1 - m) \cdot \frac{T^{\frac{1}{m}}}{T^2} \cdot t_{Ax} = 0, \quad (5.19)$$

Po úpravě (obě strany rovnice jsou násobeny zlomkem $\frac{m \cdot T}{k_1 \cdot T^{\frac{1}{m}}}$):

$$1 + (1 - m) \cdot \frac{1}{T} \cdot t_{Ax} = 0. [4] \quad (5.20)$$

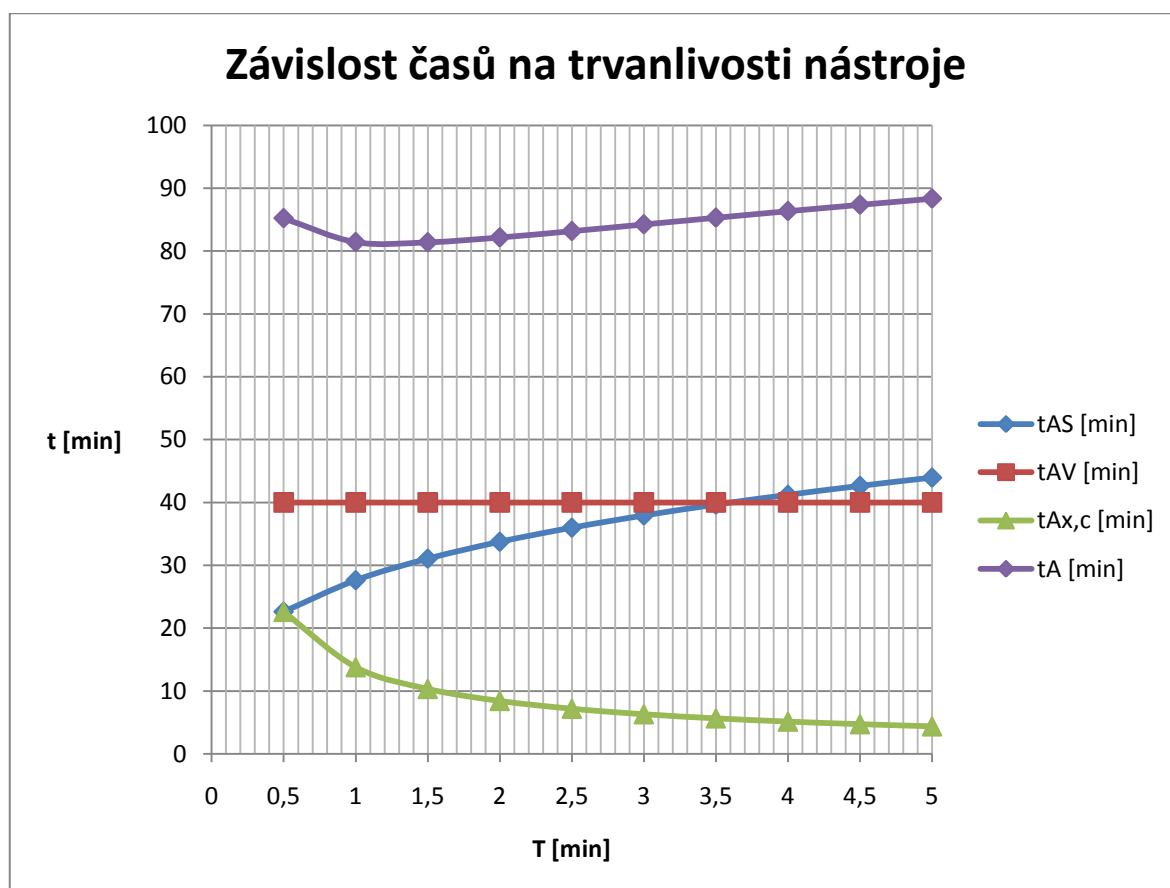
Konečnou úpravou (5.20) lze získat vztah pro výpočet optimální trvanlivosti z hlediska maximální výrobnosti:

$$T_{optV} = (m - 1) \cdot t_{Ax} [min]. [4] \quad (5.21)$$

Diagram závislostí jednotlivých časů na trvanlivosti byl vytvořen podle hodnot připravených do tabulky č. 5.1 (aplikace vztahů 5.12, 5.16 a 5.7). Diagram, vygenerovaný v softwaru Microsoft Excel (příloha A) s praktickými vstupními hodnotami (příloha A) uvedených v tabulce č. 5.1, je uveden na obr. 5.2.

Tab. 5.1 – Vstupní hodnoty pro diagram závislostí jednotlivých časů na trvanlivosti.

T [min]	t_{AS} [min]	t_{AV} [min]	$t_{Ax,c}$ [min]	t_A [min]
0,5	22,6	40	22,6	85,2
1	27,6	40	13,8	81,4
1,5	31,1	40	10,4	81,4
2	33,7	40	8,4	82,2
2,5	36,0	40	7,2	83,2
3	37,9	40	6,3	84,2
3,5	39,7	40	5,7	85,3
4	41,2	40	5,2	86,4
4,5	42,6	40	4,7	87,4
5	43,9	40	4,4	88,3



Obr. 5.2 Závislost časů na trvanlivosti nástroje v softwaru Microsoft Excel

Z uvedeného příkladu je zřejmé, že pro vyměnitelné břitové destičky, u kterých je hodnota t_{Ax} velmi malá, vychází při výpočtu podle maximální výrobnosti velmi nízká optimální trvanlivost, která by byla v praxi stěží realizovatelná (hodnoty jsou na samé hranici možností použitého obráběcího stroje). V každém případě musí proběhnout kontrola, zda jsou otáčky a výkon stroje dostačující.

5.3 Optimální trvanlivosti z hlediska minimálních výrobních nákladů

Při odvození vztahu se vychází z rovnice pro určení výrobních nákladů (3.1). Pro určení optimální trvanlivosti se hledá extrém této funkce. Snahou je vyjádřit funkci (3.1) jako funkci T . [4]

Celkové náklady obrábění lze vyjádřit vztahem:

$$N_c = N_s + N_v + N_n \text{ [Kč]}, \quad (5.22)$$

kde: N_s [Kč] - náklady na strojní práci,

N_v [Kč] - náklady na vedlejší práci,

N_n [Kč] - náklady na nástroj a jeho výměnu

a stanoví se podle vztahů:

$$N_s = t_{As} \cdot \frac{D_s}{60} \text{ [Kč]}, \quad (5.23)$$

$$N_v = t_{Av} \cdot \frac{D_v}{60} \text{ [Kč]}, \quad (5.24)$$

$$N_n = z_v \cdot N_T \text{ [Kč]}, \quad (5.25)$$

$$N_T = \frac{N_p - N_z}{x} + N_{vym} \text{ [Kč]}, \quad (5.26)$$

kde: D_s [Kč] - náklady na hodinu práce stroje,

D_v [Kč] - vedlejší náklady (z praktického hlediska $D_v = D_s = 75$ Kč),

z_v [-] - počet výměn břitů destičky,

x [-] - počet ostří břitové destičky,

N_T [Kč] - náklady na jednu trvanlivost nástroje (jeden břit destičky),

N_p [Kč] - cena břitové destičky,

N_z [Kč] - hodnota zbytku destičky,

N_{vym} [Kč] - náklady na výměnu břitové destičky. [4]

Po dosazení (5.23), (5.24) a (5.25) do (5.22):

$$N_c = t_{As} \cdot \frac{D_s}{60} + t_{Av} \cdot \frac{D_v}{60} + z_v \cdot N_T \text{ [Kč]}. [4] \quad (5.27)$$

Dosazením (5.12) do (5.27) a (5.12) do (5.15) a toho do (5.27) a úpravě lze získat vztah:

$$N_c = k_1 \cdot T^{\frac{1}{m}} \cdot \frac{D_s}{60} + t_{Av} \cdot \frac{D_v}{60} + k_1 \cdot T^{\left(\frac{1}{m}-1\right)} \cdot N_T \text{ [Kč]}, \quad (5.28)$$

Kde pro vyjádření hodnoty k_1 platí vztah (5.13). [4]

Po derivaci vztahu (5.28) podle trvanlivosti T (t_{Av} závisí na T):

$$\frac{dN_c}{dT} = k_1 \cdot \frac{1}{m} \cdot T^{\left(\frac{1}{m}-1\right)} \cdot \frac{D_s}{60} + 0 + k_1 \cdot \left(\frac{1}{m} - 1\right) \cdot T^{\left(\frac{1}{m}-2\right)} \cdot N_T. [4] \quad (5.29)$$

Po úpravě vztahu (5.29), za předpokladu, že jeho hodnota je rovna nule (podmínka extrému funkce znamená, že hodnota její první derivace je nulová):

$$\frac{k_1}{m} \cdot \frac{T^{\frac{1}{m}}}{T} \cdot \frac{D_s}{60} + \frac{k_1}{m} \cdot (1 - m) \cdot \frac{T^{\frac{1}{m}}}{T^2} \cdot N_T = 0, \quad (5.30)$$

po úpravě (obě strany rovnice jsou násobeny zlomkem $\frac{m \cdot T}{k_1 \cdot T^{\frac{1}{m}}}$):

$$\frac{D_s}{60} + (1 - m) \cdot \frac{1}{T} \cdot N_T = 0. [4] \quad (5.31)$$

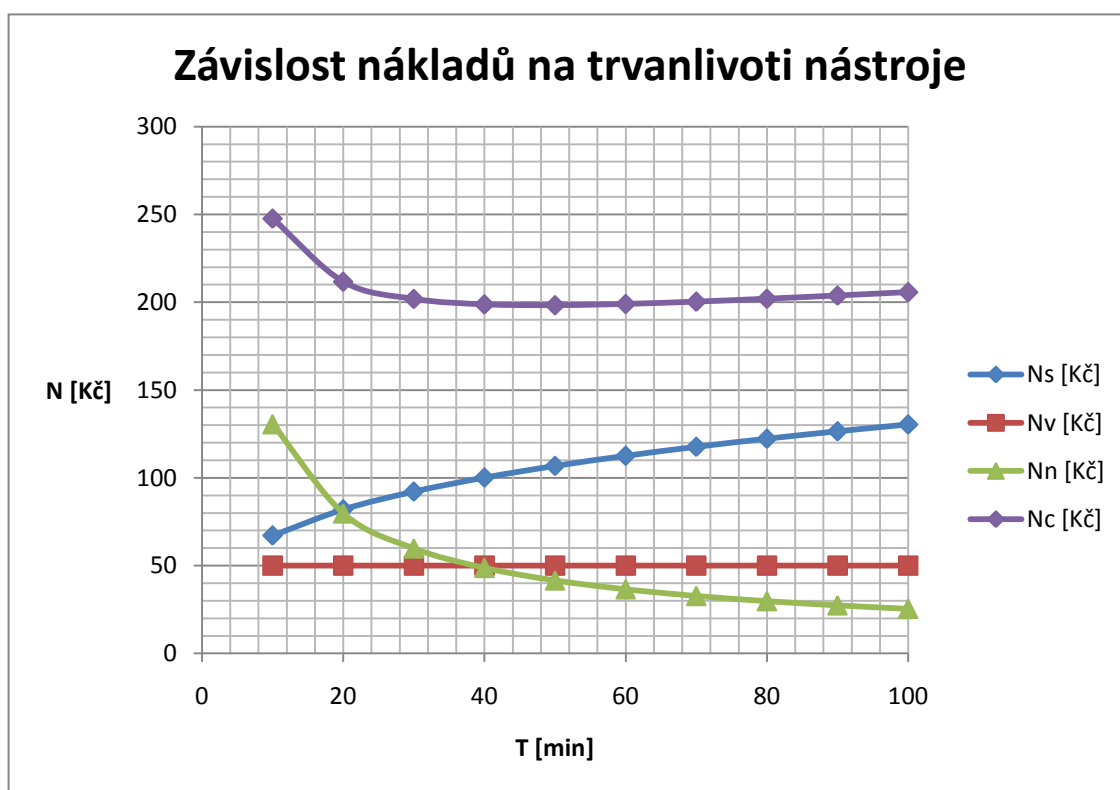
Konečnou úpravou (5.31) lze získat vztah pro výpočet optimální trvanlivosti z hlediska minimálních nákladů:

$$T_{optN} = \frac{60 \cdot N_T}{D_s} \cdot (m - 1) [\text{min}]. [4] \quad (5.32)$$

Diagram závislostí jednotlivých nákladů na trvanlivosti, vygenerovaný pomocí softwaru Microsoft Excel (příloha A), byl vytvořen podle praktických hodnot (příloha A) připravených do tabulky č. 5.2 (aplikace vztahů 5.23, 5.24, 5.25 a 5.22, za použití vztahů 5.12, 5.15 a 5.26). Diagram, zpracovaný podle tabulky č. 5.2 je uveden na obrázku č. 5.3.

Tab. 5.2 – Vstupní hodnoty pro diagram závislostí jednotlivých nákladů na trvanlivosti.

T [min]	N _s [Kč]	N _v [Kč]	N _n [Kč]	N _c [Kč]
10	67,1	50,0	130,6	247,7
20	81,9	50,0	79,7	211,7
30	92,1	50,0	59,8	201,9
40	100,1	50,0	48,7	198,8
50	106,7	50,0	41,5	198,3
60	112,5	50,0	36,5	199,0
70	117,6	50,0	32,7	200,3
80	122,2	50,0	29,7	202,0
90	126,5	50,0	27,3	203,8
100	130,4	50,0	25,4	205,7



Obr. 5.3 Závislost nákladů na trvanlivosti nástroje v softwaru Microsoft Excel

Ve vyšetřovaném technologickém prostředí je dostatečný až předimenzovaný výkon stroje, ale nedostatečné otáčky pro obráběné průměry kovacích zápusťek (v blízkosti osy rotace). Proto všude tam, kde nejsou dostatečné rezervy u obráběcích strojů z hlediska výkonu stroje P_e , z hlediska maximálních otáček dosažitelných na stroji $n_{s, max}$, resp. z hlediska maximálních minutových posuvů dosažitelných na stroji $f_{s, max}$, je nutné řešit optimalizaci řezných podmínek a trvanlivosti nástrojů ve vzájemné vazbě komplexně.

5.4 Optimální trvanlivost bez uvažování omezujících podmínek

Za určitých okolností je možné určit optimální trvanlivost T samostatně před optimalizací řezných podmínek. Určují se proto vztahy pro optimální trvanlivosti za předpokladu, že se neuplatňují omezující podmínky z hlediska výkonu stroje, maximálních otáček a minutových posuvů dosažitelných na stroji. [1]

5.5 Optimální trvanlivost s respektováním omezujících podmínek

Již dřívější výzkum potvrdil, že řada omezujících podmínek nemá vliv na určení optimální trvanlivosti. Jedná se především o ty podmínky, které nejsou funkcí otáček. Jiné omezující podmínky právě naopak způsobují, že optimální trvanlivost je nutné určovat s vazbou na tyto omezující podmínky hledáním vázaného extrému kritériální funkce. Jedná se především o omezující podmínky z hlediska výkonu obráběcího stroje, maximálních otáček, resp. maximálního minutového posuvu, které jsou dosažitelné na daném stroji. [5]

Řešení vázaného extrému pro jednotlivé omezující podmínky (např. pomocí Lagrangeových multiplikátorů) je v oblasti optimalizace řezných podmínek a trvanlivosti nevýhodné proto, že se může při optimalizaci uplatnit vždy několik omezujících podmínek. Proto je dávana přednost komplexnímu výpočtu, jehož řešením jsou optimální hodnoty řezných podmínek a trvanlivosti.

Výsledky komplexního výpočtu respektující omezující podmínky z hlediska P_e , $n_{s, max}$, resp. $f_{s, max}$ mohou vést k výrazně odlišným optimálním trvanlivostem ve srovnání s hodnotami určenými z empirických vztahů apod. [1]

U postupného způsobu optimalizace platí v praxi vžitá zásada vycházet z určité předem stanovené hodnoty trvanlivosti, která by měla být trvanlivostí

optimální a stanovená pro stroj s dostatečnou rezervou výkonu, otáček, resp. maximálních minutových posuvů. Pro určení hodnoty trvanlivosti plyne zásada obrábět celý přídavek najednou, což je pro náš případ možné, ale současně i vyhovující.

6 Oblast přípustných řešení

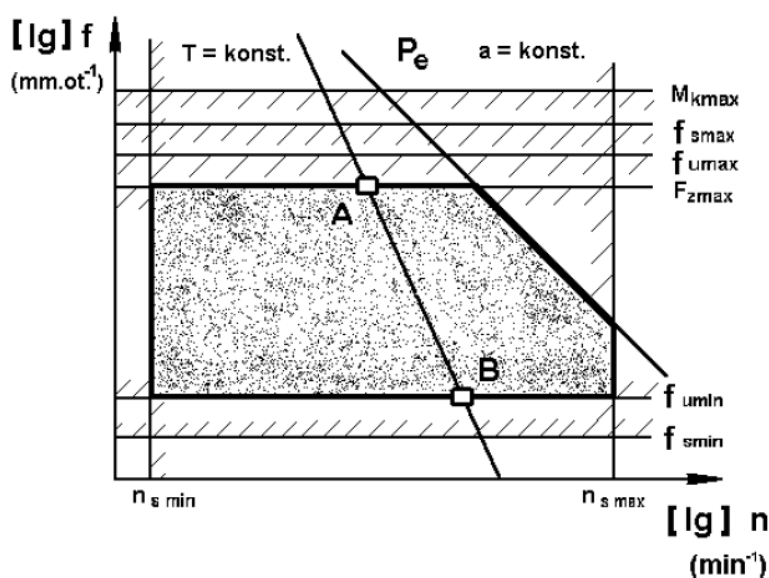
Pro sestavení oblasti přípustných řešení je nutné dodržet postup při stanovení optimálních řezných podmínek v následujícím pořadí:

- určit optimální trvanlivost nástroje T ,
- určit optimální hloubku řezu a_p ,
- určit optimální posuv f ,
- pro optimální T , a_p a f určit z Taylorova vztahu řeznou rychlost v_c a zkontrolovat zda jsou parametry stroje (výkon a otáčky vřetene) dostačující.

Všechna přípustná řešení jsou společnou oblastí omezujících podmínek, které se v dané optimalizační úloze vyskytují. Většina omezujících podmínek je mocninného charakteru a lze je logaritmováním linearizovat. Zobrazí se tedy v logaritmických souřadnicích např. v souřadném systému $(\log) f - (\log) n$ jako přímky pro určitou tloušťku odřezávané vrstvy a_p .

Následující obr. 6.1 znázorňuje příklad možného tvaru oblasti přípustných řešení pro případ, kdy posuvy na stroji jsou v $mm \cdot min^{-1}$.

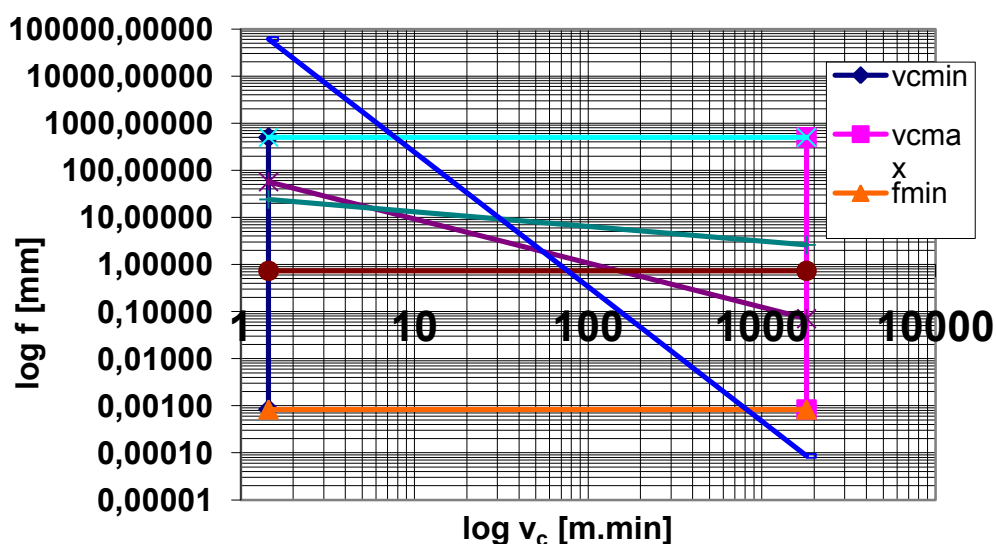
Silně orámovaná část diagramu je oblastí přípustných řešení (možných kombinací $n - f$, které lze v daném operačním úseku realizovat) za předpokladu, kdy se neuvažuje omezení z hlediska komplexního Taylorova vztahu.[1]



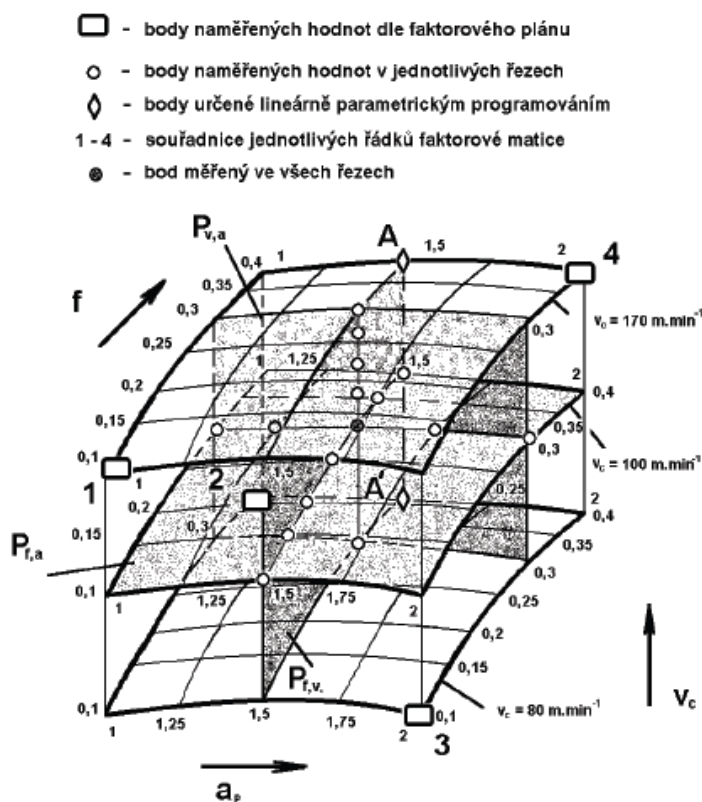
Obr. 6.1 Oblast přípustných řešení v závislosti $f - n$. [1]

Pro zobrazení tohoto omezení v diagramu $(\log) f - (\log) n$ je potřebné vycházet z $T = \text{konstanta}$ (tato trvanlivost by měla být vždy optimální). Za předpokladu, že trvanlivost $T = \text{konstanta}$, se zobrazí komplexní Taylorův vztah jako přímka. Pro uvažovaný diagram pak oblastí přípustných řešení je úsečka **A - B**.

Další možností je zobrazení oblastí přípustných řešení v diagramu závislosti $(\log) f - (\log) v_c$ (obr. 6.2) nebo oblast vymezená intervaly v_c , f a a_p (obr. 6.3).



Obr. 6.1 Oblast přípustných řešení v závislosti $f - v_c$



Obr. 6.3 Oblast přípustných řešení vymezená intervaly v_c , f a a_p . [14]

7 Optimalizace obrábění v CAD/CAM systémech

Optimalizační proces může být začleněn v CAD/CAM systému nebo mohou být řezné podmínky optimalizovány v rámci postprocesingu.

Optimalizaci obrábění ve vztahu k CAD/CAM systému můžeme rozdělit:

- optimalizace začleněna v CAD/CAM systému,
- optimalizace v rámci postprocesingu,
- samotný program, aplikující teorie optimalizace
(uživatel – optimalizační program – CAD/CAM systém). [7]

Optimalizace zmiňované v CAM systémech jsou vztahovány převážně na dráhy nástroje, nebo na určení řezných podmínek z vypracované knihovny – databáze. Není to optimalizace, jež je popisována ve výše uvedených kapitolách, která se zabývá řeznou rychlostí, posuvem, hloubkou a šířkou řezu a počtem úběrů.

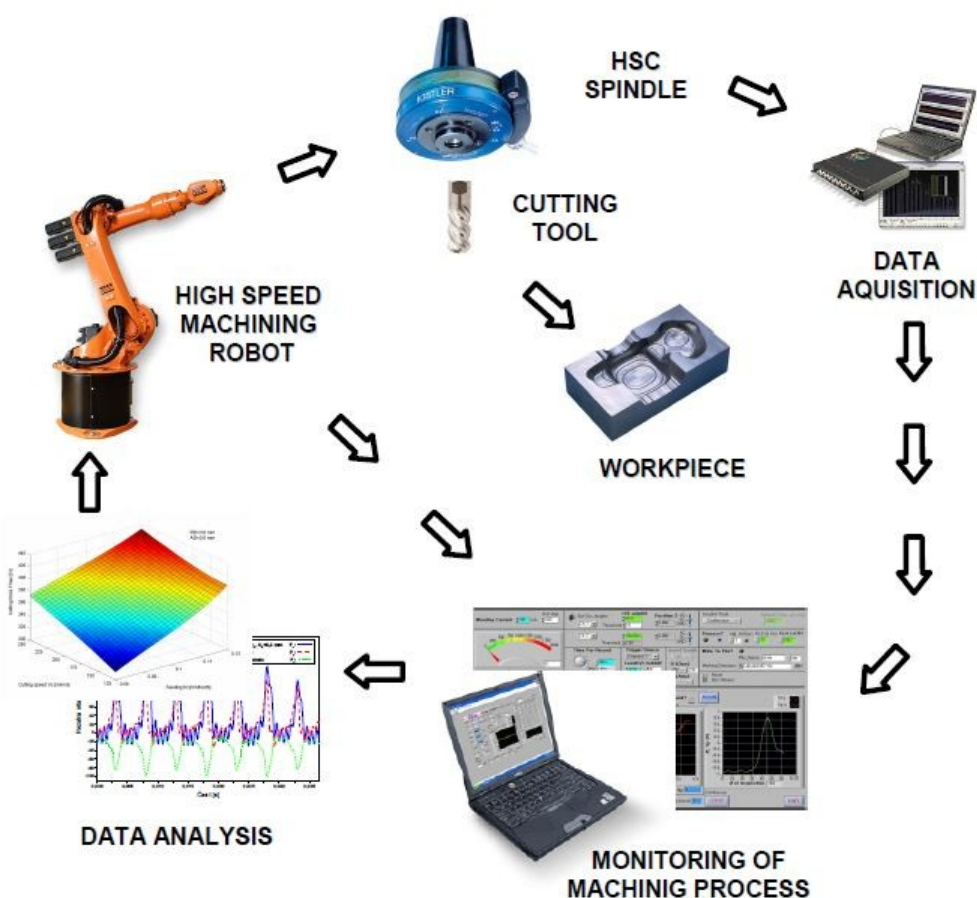
CAD/CAM systém umožňuje provádění analýzy úseku NC programu a zobrazení výsledků optimalizace. Optimalizovaný NC program je možné v tomto případě důkladně studovat. Jednotlivé velikosti posuvů jsou zobrazeny v různých barvách, což je zdůrazňuje jejich přehlednost. Tabulky úspory času ukazují původní délku a čas před optimalizací a délku a čas obrábění po optimalizaci.

Použitím optimálních strategií samotně ještě nestačí pro dostatečnou bezpečnost procesu při bezobslužném plně automatizovaném obrábění. Moderní CAM systémy jsou sice v pozici, že dokážou rozpoznat zbytkové objemy materiálu po předchozím obrábění, ale zbývají stále ještě kritické záběrové podmínky na strmých plochách nebo v rozích, které při konstantní velikosti posuvu mohou vést k přetížení nástroje, což může způsobit i zlomení tohoto nástroje. Řešením tohoto problému je přizpůsobení posuvu záběrovým podmínkám. Principiálně jsou myslitelné dva způsoby a to on-line a off-line systém.

On-line systémy (obr. 7.1) charakterizují tzv. dřívější způsoby adaptivních řízení u NC strojů. Nevýhodou těchto systémů je použití různých druhů senzorů:

- piezoelektrické snímače řezných sil a momentů,
- piezoelektrické akcelerometry pro měření zrychlení a vibrací,
- termistorové sondy pro monitorování teplotních poměrů strojů a jejich agregátů,

- videokamery pro globální sledování řezného procesu,
- interferometry se senzory s optickými vlákny pro měření kvality obráběných a obrobených povrchů, aj. [7]



Obr. 7.1 On-line monitorovací systém. [11]

Tyto senzory se využívají při monitorování řezného procesu pro zachování zpětné vazby, která je nutná pro vyrovnávání požadované a skutečné (monitorované) velikosti sledovaného parametru v procesu obrábění. S tímto vybavením samozřejmě roste i celková cena stroje. Mimo jiné dochází ke skokové změně přídatku na obrábění k jisté setrvačnosti předchozí posuvové rychlosti, což má za následek nárazové zatížení nástroje.

Použitím off-line systémů se dá zmíněná setrvačnost posuvové rychlosti odstranit. Znakem těchto systémů je analýza procesu obrábění předem, tj. před začátkem reálného obrábění, kdy se dopředu rozpoznají pozice a zatížení virtuálního nástroje na základě záběrových podmínek (symetrie záběru, úhlu sklonu dráhy, kontaktního úhlu při záběru aj.) a odebíraných objemů v každém segmentu NC programu, což sníží vyskytující se napěťové špičky v nástroji při konstantním posuvu.

Kromě již zmíněné bezpečnosti při obrábění se ještě zvýší úspora celkových časů obrábění asi o 20% i více, protože se nemusí usilovat o co největší volbu konstantní posuvové rychlosti, ale stačí pouze určit interval velikostí posuvů, které budou následně v NC programu podle záběrových podmínek generovány. [7]

Cílem off-line systémů je vytvořit originální soubor v CAD/CAM systému a nový NC program s optimalizací, vytvořeným optimalizačním programem. Program využívá optimalizaci velikosti posuvů, drah posuvů a přejezdů aj.

8 Návrh softwaru pro optimalizaci řezných podmínek

Při návrhu softwaru je důležité postupovat v logickém a přehledném sledu algoritmů. Pro návrh optimalizačního softwaru je nezbytné vybrat vhodný programovací jazyk, způsob algoritmizace, dále využít možností moderní výpočetní techniky a monitorovacích zařízení.

8.1 Způsoby algoritmizace optimalizační úlohy

Při navrhování algoritmů pro optimalizaci řezných podmínek lze postupovat řadou způsobů. Lze realizovat optimalizační algoritmy univerzálního charakteru, které zahrnují určitou technologii, resp. skupinu technologií s jejími různými variantami (hrubování nebo načisto). Tyto algoritmy mají výhodu ve své univerzálnosti, avšak jejich vážným nedostatkem je velký počet vstupních dat, který způsobuje nejen časové komplikace. [17]

Při praktickém využití těchto optimalizačních algoritmů (výpočetních algoritmů), je jejich propojení s bankou dat uloženou v paměti počítače (výpočetního softwaru), ze kterého jsou požadované soubory konstant podle potřeby optimalizačního softwaru vyvolávány. Vstupními daty optimalizačního softwaru jsou údaje o materiálu obrobku, nástroji, stroji apod. Proto je nezbytné vytvořit banku dat pro optimalizaci řezných podmínek, což není jednoduchou záležitostí. Kromě nákladových, časových a technických položek, které lze relativně snadno získat, obsahuje banka dat konstanty empirického charakteru. Tyto jsou často získávány na základě časově a nákladově náročných experimentů. Kromě toho je nutné údaje v bance dat sledovat v průběhu času a podle potřeby je upřesňovat a doplňovat. Nevýhody značného počtu vstupních dat nemají jednoúčelové algoritmy, jejich nevýhodou je ale naopak přílišná jednoúčelovost pro konkrétní případy. Tuto nevýhodu však lze odstranit vytvořením systému jednoúčelových programů pro určité obecnější zaměření.

8.2 Možnosti využití výpočetní techniky

Pro řešení těchto úloh a výpočet se dnes s výhodou využívá výpočetní technika, která umožňuje použití různého softwaru k automatizovanému výpočtu optimálních hodnot. Tyto výpočtové metody jsou často součástí matematického softwaru nebo jsou pro potřeby technologie vytvářeny speciální programy, které pracují samostatně a výsledné hodnoty jsou aplikovány ve výrobním procesu.

V automatizovaných provozech s nasazenou CNC technikou, kde se pro tvorbu konstrukce a technologie využívá PC s CAD/CAM softwarem, je výhodné zařadit část optimalizace řezných podmínek přímo do automatizované tvorby NC programů v CAM systému. [17]

Prakticky lze řešit výpočet algoritmů dvěma způsoby nebo vzájemnou interakcí mezi nimi:

- a) Vytvořením databází, které obsahují informace o obráběném materiálu, nástrojích a způsobu obrábění je první způsob. Nezbytná data pro výpočet a naplnění databáze lze určit z praktických experimentů nebo se mohou využít hodnoty z publikovaných zdrojů od samotných výrobců (např. od výrobce nástrojů). Propojením těchto naplněných databází vznikne výpočetní systém, který na základě vstupních dat (materiál obrobku, nástroje, druh obrábění, trvanlivost nástroje, určitá omezení atd.) navrhne řezné podmínky, které se budou blížit optimálním hodnotám.
- b) Druhým způsobem je zpracování optimalizace řezných podmínek pomocí matematického modelu, který by byl součástí CAM systému a byl by uveden automaticky v činnost při stanovování řezných parametrů pro prováděnou výrobní operaci.

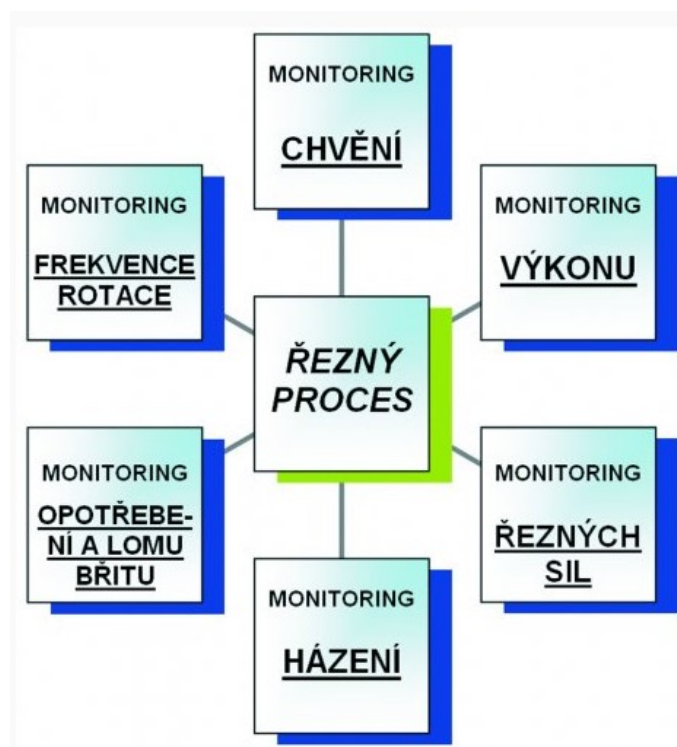
Vzájemné propojení těchto dvou způsobů by představovalo využití vnitřní databáze s matematickou podporou při stanovování řezných parametrů, a to v případě, kdy by vstupní hodnoty neodpovídaly přímo hodnotám kritérií daných databází. Možnou modifikací tohoto způsobu je softwarová optimalizace již hotového NC programu pro výrobní stroj.

Takovýto program, čítající desítky tisíc instrukcí, bývá často v současné době pouze surovým výstupem z CAD/CAM systému. To znamená, že nastavitelné řezné podmínky jsou stanoveny pro celou operaci unikátně a v průběhu této operace se nemění, i když záběrové podmínky se v závislosti na použité strategii obrábění mění každým okamžikem. Tato skutečnost s sebou nese některé negativní nákladové stránky vyplývající z omezených možností optimalizace.

8.3 Monitorování obráběcího procesu

Náklady na výrobní zařízení neustále rostou. Tato zařízení musí pracovat spolehlivě, aby se umožnilo jejich ekonomicky rentabilní využití. V důsledku vysoké spolehlivosti výrobních zařízení vybavených vhodnými monitorovacími systémy je možné dosáhnout výrazného zvýšení efektivního výrobního času, a to až o 65 % ve srovnání s obráběním bez těchto systémů. [17]

Pro monitorování obráběcího procesu (obr. 8.1) hovoří i další skutečnosti. Pro uspokojivou technickou a ekonomickou aplikaci nových řezných materiálů je třeba, aby pracovaly za vysokých řezných rychlostí a posuvů. Nasazení monitorovacích systémů podporuje i vývoj těžkoobrobitelných materiálů, u kterých charakter jejich vlastností zhoršuje možnosti jejich ekonomického obrábění.



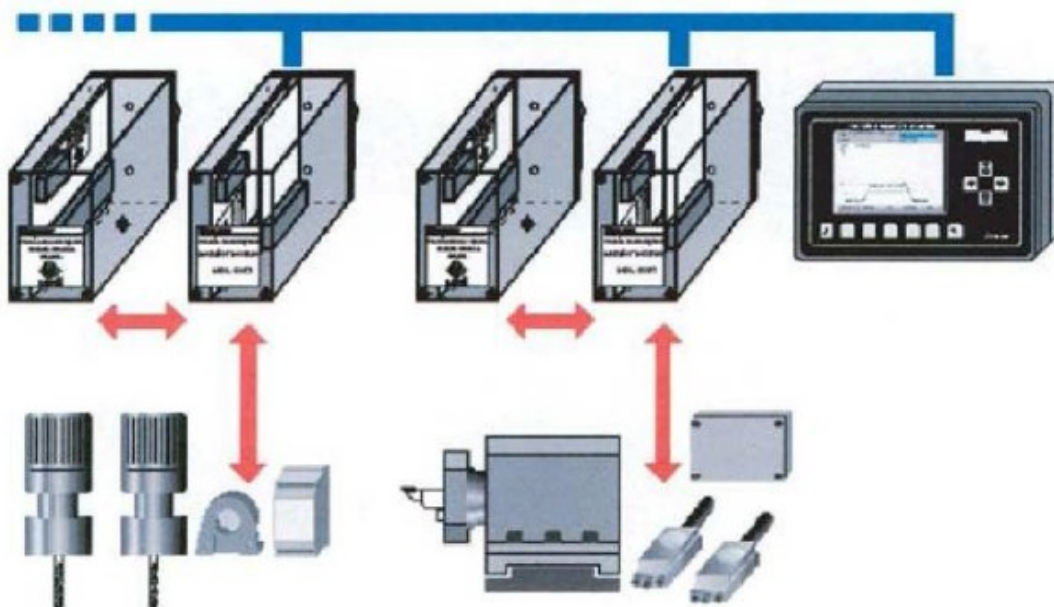
Obr. 8.1 Princip monitorování řezného procesu pomocí dílčích subsystémů. [17]

Monitorovat proces obrábění lze:

- během obrábění (inprocesní),
- po obrábění (postprocesní). [12]

8.3.1 Monitorování procesu během obrábění

Pro aktivní kontrolu stavu a zatížení nástrojů během obrábění jsou používány speciální monitory nebo bloky aktivní kontroly, realizované v rámci CNC systému. Okamžité hodnoty zatížení nástrojů jsou získávány buď z měření výkonu hlavního pohonu posuvů, nebo ze snímačů instalovaných na stroji (obr. 8.2). K hlavním nedostatkům této metody patří, že velikost snímané veličiny (výkon, moment, aj.) je zpravidla ovlivňována rušivými vlivy (pasivní odpory). Proto je snaha tyto snímače umisťovat co nejbližše k řeznému břítu, což je technicky zpravidla velmi obtížné. [12]



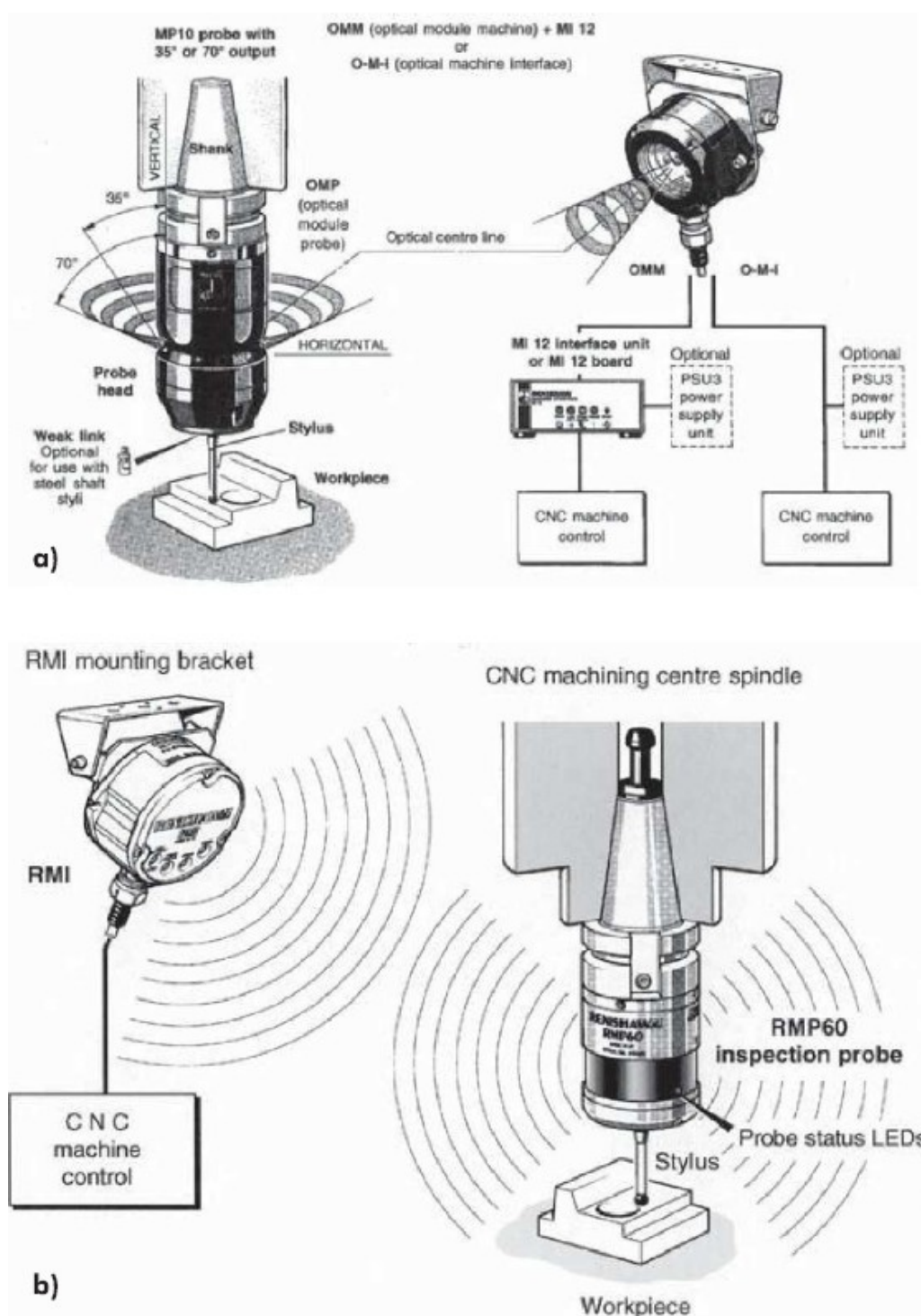
Obr. 8.2 Prvky pro měření řezného procesu (Promotec). [12]

8.3.2 Monitorování procesu po obrábění

Pro aktivní kontrolu na obráběcím centru mimo proces obrábění lze uplatnit na kontrolu rozměru polotovaru, obrobku nebo nástroje v automatickém cyklu přímo na stroji. Toto měření je nedílnou součástí programu obrábění a zahrnuje povely pro měřicí cykly, pro uložení případných korekcí do paměti systému a jejich automatické provedení při následném obrábění. Princip kontroly je založen na použití měřících sond s využitím stávajícího odměřování obráběcího centra a programového vybavení CNC řídicího systému, jak je schematicky znázorněno na obr. 8. 3. [12]

Měřicí sondy, snímače, automaticky vyměřované do vřetena stroje, jsou vybaveny bezdrátovým přenosem signálu do řídicího systému stroje, a to induktivní, optickou nebo rádiovou cestou. [12]

Pro vlastní měření využíváme speciální podprogramy, které jsou součástí programového vybavení řídicího systému CNC stroje. Tyto podprogramy automaticky třídí a vyhodnocují získané hodnoty a zavádějí příslušné korekce pro další operace obrábění.



Obr. 8.3 Měřicí sondy Renishaw. [12]

a) optický přenos, b) rádiový přenos;

Nejvýznamnější oblastí monitorování je monitorování nástroje, zejména jeho opotřebením a případné destrukce (lomy). Kromě monitorování celkové destrukce bříty lze monitorovat i vylamování menších částic bříty. Tento jev navíc identifikuje i nevhodnost použitého řezného materiálu i celého nástroje. Monitorování obráběcího procesu se provádí vhodnými senzory (nejčastěji silovými), jejichž signály se vhodnou logikou zpracovávají. Vlastní monitorování obráběcího procesu je důležitou vazbou pro jeho optimalizaci, neboť se jedná o zdroj zpětnovazebních informací. [10]

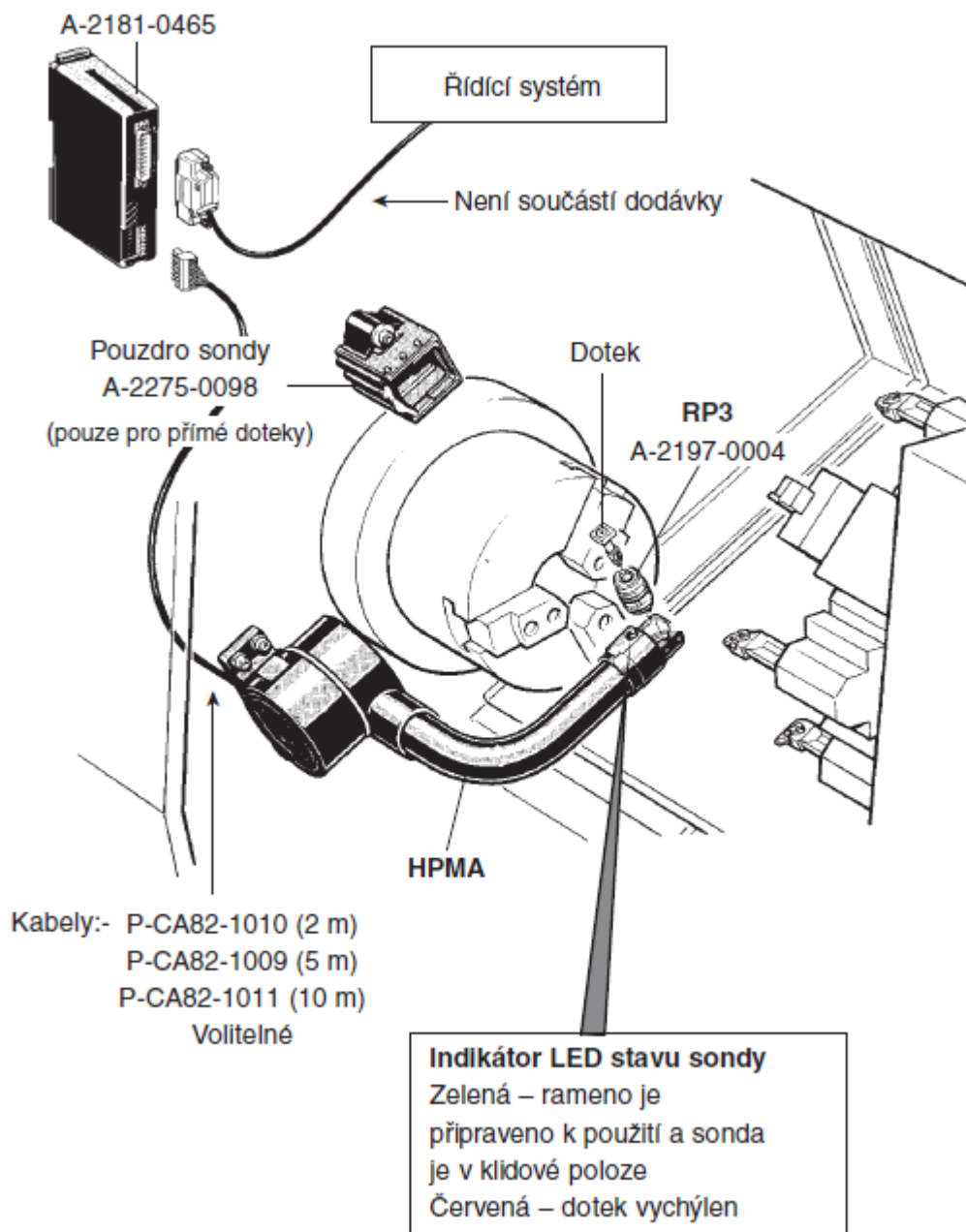
Velikost a stav nástroje hrají důležitou roli v mnoha procesech obrábění. Je velmi důležité zjistit velikost nástrojů nejenom před zahájením obrábění prvního dílce série, ale i během procesu obrábění. Po zahájení obrábění je nutné kontrolovat, zda jsou používané nástroje neporušeny a v dobrém stavu. Rychlé ustavení a kontrola nástroje přímo v obráběcím stroji zkracují seřizovací časy a minimalizují zmetkovitost.

Sortiment ramen např. firmy Renishaw k ustavování nástrojů pro CNC stroje s integrovanými měřicími dotyky nabízí uživatelům obráběcích strojů možnosti ručního i automatického využití. Jednostranné bezkontaktní dotyky umožňují systém detekce poškození nástrojů obsahující jedinečnou technologii rozpoznání nástrojů, který dokáže rozlišit nástroj od procesní kapaliny a třísek. Pro kontrolu opotřebením a detekci poškození nástroje u soustružení slouží rameno HPMA (High precision motorised arm) od společnosti Renishaw (obr. 8.4). Detail doteku sondy je na obr. 8.5.

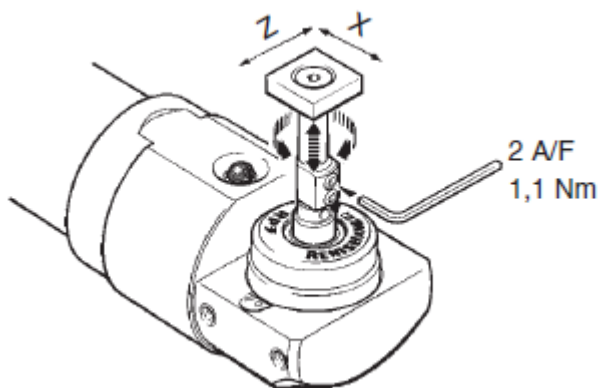
Kalibrace sondy určuje vztah mezi vřetenem stroje a polohou doteku stejně jako efektivní velikost doteku pro nastavení nástroje. Kalibraci nástrojové sondy Renishaw lze provést změřením "referenčního nástroje" o známé velikosti a poloze. Seřazením se určuje velikost a poloha řezných nástrojů ještě před jejich použitím k obrábění dílce. Pomocí ramena Renishaw pro nastavení nástrojů můžete určit velikost a polohu řezných nástrojů rychle a jednoduše. Při kontrolách poškození nástroje se zjišťuje délka nástroje a jejím porovnáním vůči poslední známé délce se zjišťuje, zda nedošlo k jeho odštípnutí nebo zlomení.

Při zjišťování zlomení nástroje se kontrolují délky nástrojů a vyhledávají se chyby v jejich nastavení. Zjišťování poškození nástroje pomáhá předejít obrábění s poškozeným nástrojem, a proto představuje nezbytnou součást automatického procesu obrábění. Sondy Renishaw pro nastavování nástrojů lze použít ke kontrole nástrojů během obráběcího cyklu. Změřením délky nástroje před a po použití můžeme zajistit, že poškozené nástroje již nebudou použity při následujících operacích. Tím se

snižuje riziko výroby zmetků, poškození stroje a zlomení nástrojů při následných operacích (např. závitníků).



Obr. 8.4 Rameno HPMA – High precision motorized arm. [13]



Obr. 8.5 Detail doteku měřící sondy HPMA. [13]

8.4 Adaptivní optimalizace řezných podmínek

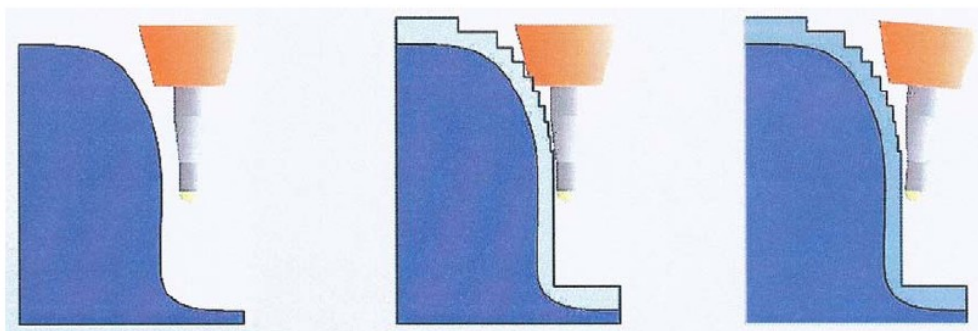
Adaptivní optimalizace (přednostně u strojů s adaptivním řízením) se uplatňuje především u CNC strojů. Základní vlastností adaptivní optimalizace při procesu obrábění je okamžité stanovení optimálních řezných podmínek, které vycházejí z informací o aktuálním stavu obráběcího procesu. Stanovení optimálních podmínek se děje podle stejných principů jako u optimalizace před obráběním. Rozdíl je pouze v tom, že do algoritmu (opět jde o analogickou soustavu omezujících podmínek a kritéria optimálnosti) vstupují informace o současném stavu obráběcího procesu ze snímačů určitých charakteristik procesu. Jde o vstupní řídící veličiny, jako jsou např. příkon hlavního elektromotoru, řezná síla, krouticí moment na vřetenu, teploty řezání, drsnost obrobené plochy, nárůst opotřebení v čase apod. Tím se počet konstant i vstupů do matematického modelu optimalizace redukuje. Kromě redukce konstant modelu má adaptivní optimalizace další výhody. Proces obrábění neustále ovlivňuje řada poruchových veličin. Těmi jsou např. hloubka řezu, průměr, na kterém se obrábí, obrobitelnost materiálu, řezivost nástroje. Snímače poskytují vstupy odpovídající realitě obrábění. Veličiny (řezné podmínky), které je daný systém schopen regulovat, se nazývají akční veličiny.

8.5 Možnosti optimalizace v oblasti CAD/CAM systémů

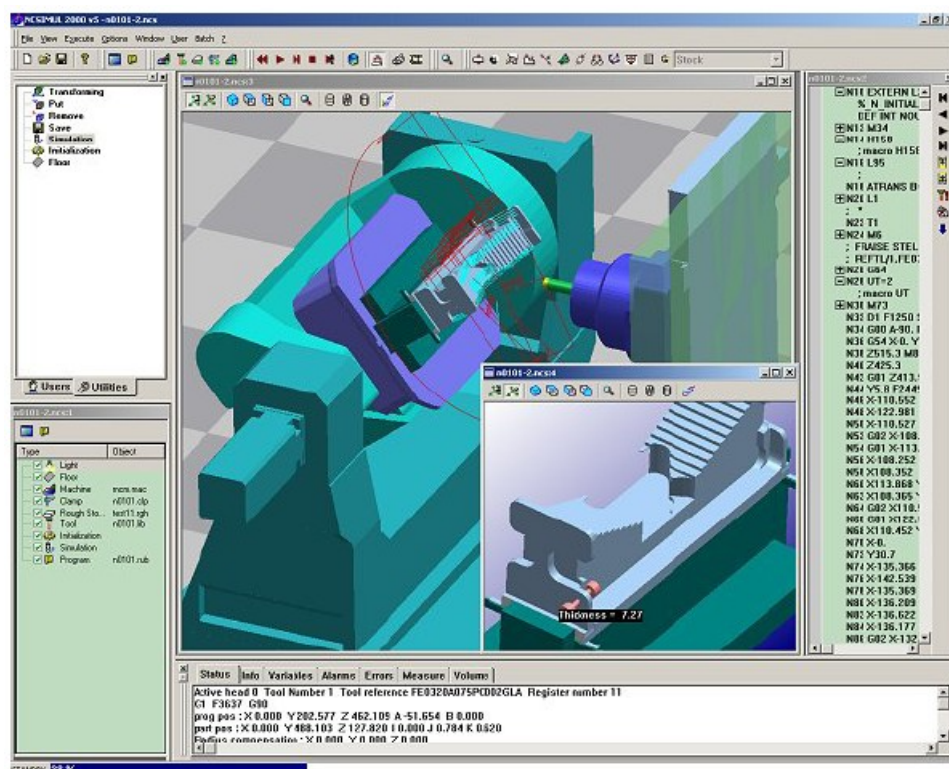
První možností, jak navrhnout – algoritmovat software pro optimalizaci řezných podmínek, jsou nezávislé optimalizační softwary, jejichž výsledkem jsou optimalizované řezné podmínky, kde vstupní hodnoty zadáváme ručně. Obvykle jsou programovány ve standardních programovacích jazycích jako je TurboPascal, VisualBasic, Delphi atd.

Druhou možností, jak hodnoty analyzovat a následně optimalizovat, je za spolupráce optimalizačního softwaru NC údajů vytvořených v CAM systému. Tento software provádí virtuální simulace obráběných obrobků. Do této skupiny patří tyto softwary:

- NC Speed (obr 8.6) – systém pro optimalizaci datových CAM výstupů,
- NC Simul (obr. 8.7) – tento systém umožňuje kontrolu NC programů nejen z hlediska nástrojů a obrobku, ale z komplexního pohledu výroby (stroj – nástroj - obrobek) – skutečná realizace,
- PC-OptiFEED – pracovní modul CAM systému Delcam. [10]



Obr. 8.6 Konverze z tříosého obrábění na pětiosé obrábění v NC Speed. [10]



Obr. 8.7 Pracovní prostředí softwaru NC Simul. [10]

Třetí možností je optimalizační software implementovat do systémů CAM. Způsob realizace je prostřednictvím přídatných modulů ve formě makra přímo do CAM systému. Tyto přídatné moduly pomohou v procesu obrábění optimalizovat dráhy nástroje, řezné parametry a NC programy na základě implementovaného modelu, výběru stroje a nástrojů automaticky.

K algoritmicizaci softwaru pro optimalizaci řezných podmínek lze využít matematických modelářů, spolupracujících s tabulkami – databázemi, vytvořených v softwaru Microsoft Excel. Mezi matematické modeláře patří např. Matlab nebo Mathematica 4.0. Tyto programy umožňují parametrickou spolupráci s programem Excel, který tvoří knihovnu údajů o obráběném materiálu, řezných nástrojích, použité procesní kapalině aj. Tyto softwary lze naprogramovat pro jakoukoliv operaci. Výpočty lze pak zpřesnit pomocí metody nejmenších čtverců nebo metodou regula-falsi.

Použitím programu Mathematica 4.0 a propojením tabulek z Excelu nám umožní při zpracování NC programů:

- možnost parametrické práce,
- automaticky kalkulovat obrysy bodů souřadnic,
- vyhnout se některých chybám při programování v pracovní fázi,
- snadnější zpracování NC programů pro testování každé pracovní fáze, zvláště na obráběcích strojích. [9]

8.6 Návrh softwaru v Microsoft Excelu

Součástí diplomové práce je návrh softwaru pro výpočet optimálních řezných podmínek. Pro vytvoření databáze – knihovny nástrojů (obr. 8.8), materiálových konstant, materiálů a empirických vztahů je Microsoft Excel nejjednodušším tabulkovým softwarem. K vytvoření tabelizovaných hodnot můžeme použít přehledné záložky a filtry. Software Microsoft Excel umožňuje vytvoření vzorců a jejich vzájemné propojení. Z vypočítaných hodnot a tabulek lze jednoduše vytvořit grafy, které jsou nezbytné pro vyhodnocení optimálních řezných podmínek.

Naprogramovat software, který by vypočítával a vyhodnocoval optimální řezné podmínky během procesu obrábění, což znamená, že by vstupní hodnoty vstupovaly do programu ze snímačů a sond z obráběcího stroje automaticky, není lehkou záležitostí. Programovací jazyky jako jsou Delphi, VisulBASIC, Mathematica nebo Matlab vyžadují určitou programátorskou zkušenost.

Pro určení optimálních řezných parametrů byl využit software Microsoft Excel, který vyhodnocuje optimální řezné parametry na základě ručně zadaných vstupních parametrů. Tento program bude sloužit jako šablona pro naprogramování softwaru v jiném pokročilejším programovacím jazyce a v další fázi návrhu softwaru bude sloužit jako databáze nebo knihovna, kterou pak bude možné s pokročilejším programovacím jazykem parametrizovat a následně do něj informace o strojích, nástrojích a konstantách z databáze importovat.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	Nástrojové vybavení pro soustružení																
2		Č.N.	Popis	κ_r	Nástrojový držák	VBD	Materiál	Poloměr špičky r_e [mm]	a_p [mm]	f [mm]	Max. délka řezu	Průměr	Komentář				
3	Stranové nože ubírad	1.	Stranový nůž ubírací levý	95°	PCLNL 2525 M 12	CNMG 12 04 08 EM 6630	SK	0,8	1 - 5	0,2 - 0,5	0	0	pro polohrubovací a lehčí hrubovací soustružení ocelí, korozivzdorných ocelí, ale také litiny				
4		2.	Stranový nůž ubírací levý	93°	PDJNL 2525 M 15	CNMG 12 06 08 EM 6630	SK	0,8	1 - 3,5	0,2 - 0,4	0	0	pro polohrubovací a lehčí hrubovací soustružení ocelí, korozivzdorných ocelí, ale také litiny				
5	Stranové nože ubírad pravé	3.	Stranový nůž ubírací pravý	93°	PCLNR 2525 M 15	DNMG 15 06 08 EM 6630	SK	0,8	1 - 3,5	0,2 - 0,4	0	0	pro polohrubovací a lehčí hrubovací soustružení ocelí, korozivzdorných ocelí, ale také litiny				
6		4.	Stranový nůž ubírací pravý	93°	PCLNR 2525 M 15	DNMG 15 06 04 EM 6630	SK	0,4			0	0	pro polohrubovací a lehčí hrubovací soustružení ocelí, korozivzdorných ocelí, ale také litiny				
7	Soustružnické nože levé	5.	Soustružnický nůž levý	90°	PTGNL 2525 M 16	TNMG 16 04 08 EM 6630	SK	0,8	1 - 4	0,2 - 0,4	0	0	pro polohrubovací a lehčí hrubovací soustružení ocelí, korozivzdorných ocelí, ale také litiny				
8		6.	Soustružnický nůž levý	95°	PWLNL 2525 M 08	WNMG 08 04 08 EM 6630	SK	0,8	1 - 5	0,2 - 0,5	0	0	pro polohrubovací a lehčí hrubovací soustružení ocelí, korozivzdorných ocelí, ale také litiny				
9	Soustružnické nože koproval	7.	Nůž soustružnický koproval	72° 30'	SVVCN 2525 M 16	VCMT 16 04 08 EUM 320P	SK	0,8	1 - 2	0,1 - 0,2	0	0	soustružení na čisto, polohrubovací a hrubovací soustružení nepřerušovaným řezem				
10		8.	Nůž soustružnický koproval	72° 30'	SVVCN 2525 M 16	VCMT 16 04 04 EUM 320P	SK	0,4			0	0	soustružení na čisto, polohrubovací a hrubovací soustružení nepřerušovaným řezem				
11	Soustružnické nože závitrad	9.	Nůž na soustružení vnějších závitů		SEL 2525 M 16	TN 16 EL 300M 816	SK	0,8			0	0	jemné, dokončovací a polohrubovací soustružení běžných, žárupevných a žáruvzdorných ocelí				
12		10.	Nůž na soustružení vnějších závitů		SEL 2525 M 16	TN 16 EL 150M 816	SK				0	0	jemné, dokončovací a polohrubovací soustružení běžných, žárupevných a žáruvzdorných ocelí				
13	Soustružnické nože zapichovad	11.	Zapichovací nůž (1)		XL CFL 2520 K 03	LFUX 03 08 02 TN 535P	SK	0,2		0,1 - 0,2	0	0	soustružení běžných i ušlechtilých ocelí a ocelolitiny				
14		12.	Zapichovací nůž (2)		XL C FN 3202 M 03	LFUX 03 08 02 TN 535P	SK	0,2		0,1 - 0,2	0	0	soustružení běžných i ušlechtilých ocelí a ocelolitiny				

Obr. 8.8 Databáze nástrojů vytvořená v softwaru Microsoft Excel

8.6.1 Software pro optimalizaci řezných podmínek

Jak je uvedeno v úvodu kapitoly 8.6, software pro optimalizaci řezných podmínek bude vycházet z databáze či knihovny a šablony, která byla vytvořena v softwaru Microsoft Excel. Na základě zkušeností programátora bude vybrán programovací jazyk, ve kterém je možné optimalizační software naprogramovat a ze kterého bude výstupem program, do kterého už nebude moci uživatel z hlediska úpravy vzorců a empirických vztahů vstupovat. Doplnovat půjde pouze databáze a bude zde možnost vybrat optimalizační kritéria, vstupní hodnoty, určitá omezení aj.

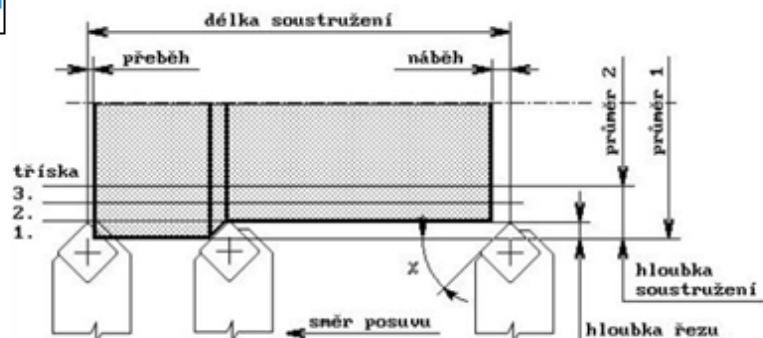
Z hlediska uživatele musí být program pro optimalizaci řezných podmínek jednoduchý, s uživatelsky příjemným a přehledným prostředím (obr. 8.9). Jeho předností by mělo mít jednoduché ovládání, které nebude vyžadovat rozsáhlé zaškolení operace. Měl by obsahovat interaktivní nápovědu, předdefinovaná data, které bude moci uživatel změnit a stručné, ale výstižné obrázky, vysvětlující dosazovanou veličinu. Software by měl být dodáván jako samotný, tedy bez spolupráce s CAM systémem nebo jako program, který bude možné implementovat do CAM systému např. ve formě plug-in a bude součástí výstupu postprocesoru. V tomto případě můžeme hovořit o optimalizačním softwaru naprogramovaném „na míru“.

Jak je naznačeno na obr. 8.9, navržený software by měl umožňovat výběr operace (soustružení, frézování atd.). Z databáze o použitých nástrojích a strojovém vybavení podniku, která bude vytvořena ručně, si software automaticky vyhledá potřebná data o těchto prvcích (rozměry nástroje, úhel čela, úhel hřbetu, úhel nastavení, poloměr špičky, minimální a maximální otáčky stroje, maximální výkon, maximální přípustný krouticí moment, maximální a minimální posuv stroje atd.). Tato databáze bude pro uživatele softwaru volně přístupná pro případnou opravu dat nebo vložení nových informací.

V tab. 8.1 je uveden přehled zadaných (bílé pole) a vypočítaných (zelené pole) parametrů pomocí softwaru navrženého v softwaru Microsoft Excel. Tabulka je rozdělena na 3 části. V první části jsou navrženy optimální parametry pomocí oblasti přípustných řešení, se kterými dále software pracuje pro vyhodnocení kritéria maximální produktivity a pro vyhodnocení kritéria minimálních nákladů.

Software by měl uživateli nabídnout možnosti, na základě kterých by určil konečné řezné parametry. Uživatel by si měl vybrat, jestli se určí konečné řezné

parametry na základě kritéria maximální produktivity nebo minimálních nákladů. Rozšířenou možností by mohlo být vícekritériální optimalizace.

SOFTWARE PRO OPTIMALIZACI ŘEZNÝCH PODMÍNEK			
Nápopěda	Výkres	Postup	Korekce
Obrázek	Poznámky	Kalkulačka	Nastavení
SOUSTRUŽENÍ ▼ délné vnější			
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-right: 10px;"> SOUSTRUŽENÍ FREZOVÁNÍ </div>  </div>			
90,00	průměr 1 [mm]	Stranový nůž uběrací pravý	nástroj
80,00	průměr 2 [mm]	Soustružnické centrum SKT15	stroj
50,00	délka [mm]	14	obrobitelnost
1	počet břitů	600	pevnost [MPa]
1	počet třísek	válcovaný	povrch
15	trvanlivost T [min]	1	délka přerušení [mm]
		20000	počet suportů
		dokončování	<< max. síla [N]
			IT
určit optimální trvanlivost nástroje			ano
kritérium optimálnosti			maximální produktivita

Obr. 8.9 Grafický návrh uživatelského prostředí softwaru pro optimalizaci řezných podmínek pro případ podélného soustružení

90,00	průměr 1 [mm]	Stranový nůž uběrací pravý	stroj
80,00	průměr 2 [mm]	Stranový nůž uběrací pravý	stroj
50,00	délka [mm]	Soustružnický nůž levý	obrobitelnost
1	počet břitů	Nůž soustružnický kopírovací	pevnost [MPa]
1	počet třísek	Nůž na soustružení vnějších závitů	povrch
15	trvanlivost T [min]	Nůž na soustružení vnějších závitů	délka přerušení [mm]
		20000	počet suportů
		dokončování	<< max. síla [N]
			IT
určit optimální trvanlivost nástroje			ano
kritérium optimálnosti			maximální produktivita

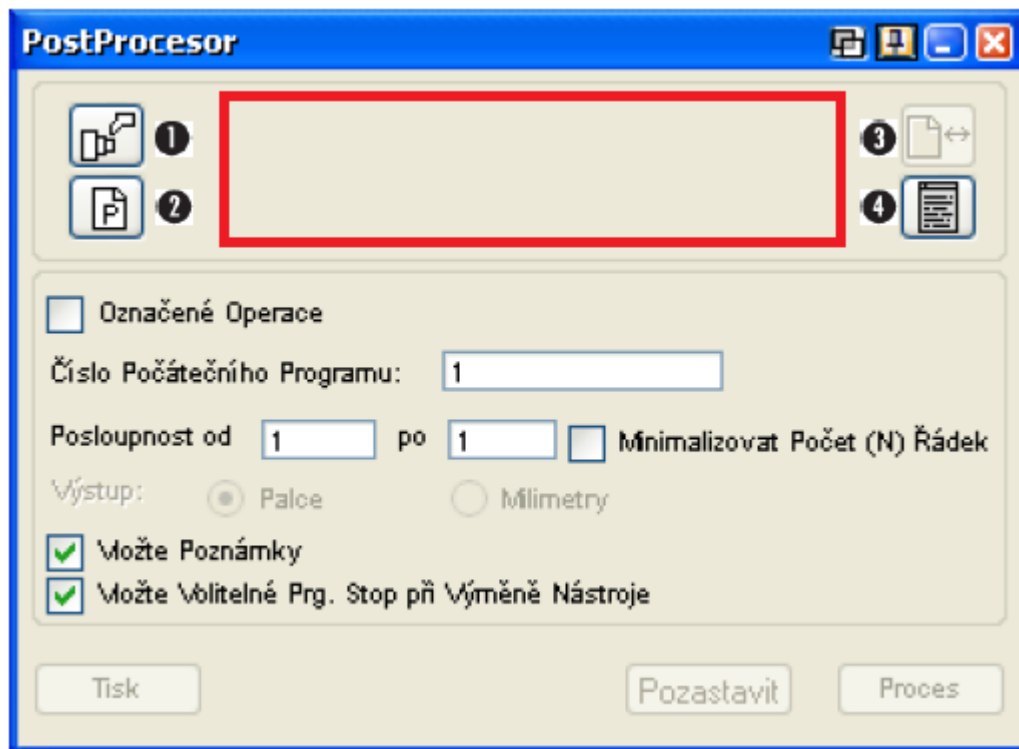
Obr. 8.10 Rozevírací seznam, umožňující výběr nástroje z databáze

Tab. 8.1 – Přehled zadaných (bílé pole) a vypočítaných (zelené pole) řezných parametrů.

Přehledná tabulka zadaných a vypočítaných řezných parametrů			
oblast přípustných řešení - optimální parametry			
průměr obrobku před soustružením	D_{max}	96	mm
průměr obrobku po soustružení	D_{min}	46	mm
délka náběhu	l_n	2	mm
délka výběhu	l_p	3	mm
dráha nástroje v třísce	l	185	mm
hloubka řezu	a_p	6	mm
posuv	f	0,50	mm
řezná rychlost	v_c	80	m.min ⁻¹
přídavek na obrábění	h_c	25	mm
počet třísek	i	5	[-]
Kritérium maximální výrobnosti			
čas jednotkové nepravidelné obsluhy	t_{AX}	4	min
jednotkový vedlejší čas	t_{AV}	9	min
čas rychloposuvu	t_{rychl}	0,1	min
součinitel	λ	0,97	[-]
otáčky	n	300	min ⁻¹
řezná rychlost	v_c	90,48	m.min ⁻¹
trvanlivost	T	7,07	min
počet obrobených kusů na jednotku T	Q_T	1,74	ks
jednotkový strojní čas	t_{AS}	4,18	min
čas na výměnu nástroje	t_n	2,3	min
operační čas jednotkové práce	t_A	15,48	min
Kritérium minimálních nákladů			
hodinová sazba stroje	N_{SH}	1800	Kč
cena VBD	N_1	300	Kč
cena držáku	N_2	1100	Kč
sazba vedlejších prací	D_V	900	Kč
počet garant upnutí	z	1500	[-]
otáčky	n	350	min ⁻¹
řezná rychlost	v_c	105,56	m.min ⁻¹
trvanlivost	T	4,45	min
jednotkový strojní čas	t_{AS}	3,58	min
počet obrobených kusů na jednotku T	Q_T	1,276	ks
náklady na strojní čas	N_S	107,49	Kč
náklady na nástroj	N_N	59,36	Kč
náklady na vedlejší práci	N_V	135	Kč
celkové operační náklady	N_C	301,85	Kč
náklady na 1 břit nástroje	N_T	75,73	Kč/ks

Při vývoji softwaru pro optimalizaci řezných podmínek a jeho aplikaci v praxi lze uvažovat i o spolupráci s vývojáři CAM systémů (GibbsCAM, SurfCAM, SolidCAM, EdgeCAM, MasterCAM, PowerMILL aj.) nebo s výrobcí obráběcích CNC strojů (HAAS, Mazak, Hwacheon, Mori Seiki, Rödgers, Yasda aj.), kteří by mohli být při vývoji softwaru nápomocní. Dalo by se hovořit o prodeji CAM systému nebo CNC stroje

přímo s optimalizačním softwarem ve formě plug-in, který by byl soustředěn do oblasti nastavení parametrů, týkajících se postprocesoru. Na obr. 8.11 je červeně orámovaná oblast, do které by mohl být umístěn odkaz na vyvolání okna pro nastavení parametrů, týkajících se optimálních řezných podmínek.



Obr. 8.11 Nastavení Postprocesoru v softwaru GibbsCAM

1 – výběr postprocesoru, 2 – výstupní soubory, 3 – komunikace, 4 – výstupní text, červeně orámovaná oblast naznačuje místo určené pro odkaz na vyvolání okna k zadání parametrů pro optimalizaci řezných podmínek;

9 Závěr

V diplomové práci jsem se zabýval návrhem softwaru pro optimální řezné parametry konvenční optimalizace. Výsledkem je návrh optimalizačního softwaru v softwaru Microsoft Excel (příloha A).

Z dosažených výsledků diplomové práce „Návrh softwaru pro optimalizaci řezných podmínek“ vyplývají tyto závěry:

- a) Software pro optimalizaci řezných podmínek lze navrhnout tak, že určuje a vyhodnocuje optimální řezné podmínky před procesem obrábění, tzn., že jsou hodnoty zadávány ručně (konvenční obrábění) a půjde jej zakomponovat do prostředí CAM softwaru. Optimální řezné parametry budou výstupem spolu s postprocesorem pro konkrétní obráběcí stroj.
- b) Vyvíjet software za účelem požadavků trhu a soustředit se na softwary pro optimalizaci řezných podmínek od jednodušších operací (vrtání, vyvrtávání, obrážení aj.) po technicky složitější operace (soustružení, frézování).
- c) Důležitým kritériem je určit, zda se bude proces obrábění týkat hrubování nebo dokončování. Při obrábění načisto, ve většině případů, není třeba brát v úvahu výkon elektromotoru a tuhost obráběcího stroje. Průřez třísky je malý. Kritériem volby řezných podmínek je přesnost obrobku a drsnost obrobené plochy a integrita obrobeného povrchu. Hloubka odřezávané vrstvy je známá a je dána přídatkem na obrábění, který zůstal po hrubování. Posuv je omezen pouze požadovanou drsností a integritou povrchu, protože by bylo obtížné vázat jej na přesnost obrábění.
- d) Software musí umožnit na základě zadaných vstupních parametrů výběr mezi vyhodnocením optimálních řezných parametrů z hlediska maximální produktivity, minimálních nákladů nebo jejich kombinací.
- e) Z hlediska složitosti vývoje softwaru lze realizovat optimalizaci řezných podmínek při jednonástrojovém obrábění a následně vyvíjet – „ladit“ software pro práci na jednom stroji s více nástroji současně, práci více

strojů, které jsou vázány taktem výroby (automatické výrobní linky) a práci více strojů, které jsou vázány organizačně (pružné výrobní systémy).

- f) Pro správnou funkci softwaru je nezbytné tabelizovat databázi používaných řezných nástrojů a strojového parku. Databáze musí obsahovat všechny nezbytné parametry a materiálové konstanty, které jsou potřebné pro určení oblasti přípustných řešení. Databáze je pak propojena se softwarem, který si potřebné parametry z této knihovny vyhledá automaticky. Databáze musí být volně přístupná uživateli, aby umožnila přidávat informace ohledně nových nástrojů, strojů a obráběných materiálů.
- g) Pro vytvoření databáze a šablony pro vývoj optimalizačního softwaru lze využít softwaru Microsoft Excel. Tento software pak bude možné s pokročilejším programovacím jazykem (Delphi, Visual Basic, Oracle, Matlab aj.) parametrizovat a následně do něj informace o strojích, nástrojích a konstantách z databáze importovat.
- h) Použitím optimalizačního systému můžeme dosáhnout snížení strojového času, prevence proti zlomení a poškození nástroje, což zvyšuje trvanlivost a životnost nástroje, zvýšení přesnosti, jakosti a integrity obrobeného povrchu a omezení pohybů nástroje.
- i) Při vývoji softwaru pro optimalizaci řezných podmínek a jeho aplikaci v praxi lze uvažovat o spolupráci s vývojovým týmem CAM systémů (GibbsCAM, SurfCAM, SolidCAM, EdgeCAM, MasterCAM, PowerMILL aj.) nebo s výrobcí obráběcích CNC strojů (HASS, MAZAK, Hwacheon, Mori Seiki, Rödgers, Yasda aj.), kteří by mohli navzájem spolupracovat a optimalizační software následně dodávat s CAM softwarem nebo CNC strojem ve formě plug-in.
- j) Prostředí softwaru pro optimalizaci řezných podmínek by mělo být přehledné. Jeho předností by mělo být jednoduché ovládání, které nebude vyžadovat rozsáhlé zaškolovací operace. Software by měl obsahovat interaktivní nápovědu, předdefinovaná data, které bude moci uživatel měnit a stručné, ale výstižné obrázky, vysvětlující dosazovanou veličinu.

- k) Software je vhodný nejen pro technology k určení optimálních řezných podmínek, ale i pro normovače k výpočtům strojních časů.

Z výše popsaných závěrů, týkajících se softwaru pro konvenční optimalizaci lze v budoucnu uvažovat nad vývojem a aplikací softwaru pro adaptivní optimalizaci, vyhodnocováním optimálních řezných parametrů během procesu obrábění. Cílem vývoje softwaru pro adaptivní optimalizaci je:

- a) Vyvinout software, který bude vyhodnocovat optimální řezné parametry nepřetržitě během procesu obrábění.
- b) Zvolit správný a v pracovním prostoru stroje vhodně umístěný monitorovací systém, který odesílá přijatá data přímo do optimalizačního softwaru a s těmito daty přepočítává optimální řezné parametry. Celý proces musí probíhat ve zlomku sekundy.
- c) Aplikovat monitorovací systém pro optimalizaci tvarové a rozměrové přesnosti. Systém monitoruje a detekuje opotřebení a poškození nástroje. Předchází zmetkovitosti nebo případnému poškození navazujících nástrojů po předchozí operaci.

Ve všech případech, v návrhu softwaru pro konvenční i adaptivní optimalizaci však hovoříme o složité a časově náročné záležitosti. Musíme myslet nejdříve na prototypním softwaru, který bude nutné nejdříve v praxi odzkoušet, případně provést řadu experimentů. Software bude nutné tzv. „odladit“, aby nedošlo k chybě, která by se mohla v praxi projevit ve formě kolizí, havárií apod. což by představovalo škody v řádech i několika miliónů korun.

Návrh softwaru, který je součástí diplomové práce (viz příloha A), byl naprogramován v softwaru Microsoft Excel jako šablona pro implementaci empirických vztahů do pokročilejšího programovacího jazyku. Lze jej aplikovat pro jednoduché hrubovací operace podélného soustružení, kdy na základě vstupních parametrů vyhodnotí jak početně, tak i graficky, optimální trvanlivost nástroje, optimalizační kritéria z hlediska minimálních nákladů nebo maximální výrobnosti a oblast přípustných řešení. Z praktického hlediska však software nebyl odzkoušen.

Diplomová práce je prvním krokem spolupráce s vývojáři softwaru KOVOProg, kteří usilují o propojení optimalizace s postprocesorem. Na dokončení vývoje softwaru pro optimalizaci řezných podmínek bych chtěl pokračovat v doktorském studiu, jelikož je vývoj časově i technicky velmi náročný. Navržený software bude sloužit ke školním účelům Katedry obrábění a montáže na Vysoké škole báňské – Technické universitě v Ostravě a pro strojírenský průmysl v praxi.

Děkuji Ing. Markovi Sadílkovi, Ph.D., z katedry obrábění a montáže VŠB -TU Ostrava za cenné a podnětné rady a připomínky při vypracování diplomové práce.

Použité zdroje

- [1] BRYCHTA, J., ČEP, R., SADÍLEK, M., PETŘKOVSKÁ, L., NOVÁKOVÁ, J. *Nové směry v progresivním obrábění*. E-learningové prvky pro podporu výuky odborných a technických předmětů. 2007. Ediční středisko VŠB-TUO, 251 s. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [2] ADAMEC, J., TICHÁ, Š. *PROGRAMOVÁNÍ CNC SYSTÉMU EMCOTRONIC TM02 – SOUSTRUŽENÍ: skriptum*, 1. vyd. Ostrava: VŠB -TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 2008. 105 s. ISBN 978-80-248-1915-0
- [3] DRÁB, V. *TECHNOLOGIE I.*, 1. vyd. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1985. 195 s.
- [4] HUMÁR, Anton. *TECHNOLOGIE I VÝPOČTOVÁ CVIČENÍ: Studijní opory pro magisterskou formu studia*. Vyd. 1. BRNO: Vysoké učení technické v Brně, 2003. Trvanlivost nástroje, s. 60.
- [5] HUMÁR, Anton. *TECHNOLOGIE I TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ: Studijní opory pro magisterskou formu studia*. Vyd. 1. BRNO: Vysoké učení technické v Brně, 2003. s. 138.
- [6] ZUPERL, U., CUS, F. *Optimization of Cutting Conditions During Machining by Using Neural Networks*. Maribor: Production Engineering Institute, Faculty of Mechanical Engineering. 2000. p. 11.
- [7] SADÍLEK, M. *CAM systémy v obrábění I. – II. doplněné vydání*. Ostrava: Fakulta strojní, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2010. 143 s. ISBN 978-80-248-2278-4.
- [8] Sortiment výrobků společnosti Renishaw. *Produkty pro měření, zlepšování kvality a zvyšování produktivity*. Katalog. Vytlačeno v Anglii. 2010. 8 s.
- [9] CALBUERANU, L., STANIMIR, A., CRACIUNOIU, N. *The Programming of the HAAS CNC Lathes using Mathematica 4.0 Program*. Constantin Brancusi University – Engineering Faculty. 2002. 6 p.
- [10] ČUBOŇOVÁ, N., MICHALCO, M. *Optimization Possibilites in CAD/CAM*. University of Zilina, Department of Machining and Automation. 7th International Multidisciplinary Conference. Romania. 2007. 6 p.
- [11] MILFELNER, M., KOPAC, J. *Intelligent system for machining and optimization of 3D sculptured surfaces with ball-end milling*. Faculty of Mechanical

Engineering, University of Maribor. Slovenia. Journal of Achievements in Materials and manufacturing Engineering. January – February 2006. 7 p.

- [12] MAREK, J. *Konstrukce číslicově řízených strojů. Aktivní kontrola, adaptivní řízení a technická diagnostika CNC strojů*. Speciální vydání MM Průmyslové spektrum, 1. Vydání, 2006. s. 4.
- [13] Renishaw. *Instalační a uživatelská příručka. Rameno HPMa (High precision mororised arm)*. 42 s. H-2000-5141-04-A (CZ). Vydáno 12/2004.
- [14] SADÍLEK, M. *Základní charakteristiky optimalizace podmínek obrábění*. Ostrava: Fakulta strojní, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2010. Přednáška. 19 s.
- [15] MÁDL, J. *Optimalizace řezných podmínek v teorii obrábění*. Praha: ČVUT Praha, 1988. 57 s.

Elektronické zdroje

- [16] CHLADIL, J. *Aplikace PC pro optimalizaci řezných podmínek*. 1997 [on-line]. [cit. 2010-11-06]. Dostupné z: <<http://fstroj.utc.sk/journal/sk/015/015.htm>>.
- [17] SKOPEČEK, T. *Algoritmizace optimalizačních úloh pro obrábění*. 2006 [on-line]. [cit. 2011-01-17]. Dostupné z: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/algoritmizace-optimalizacnich-uloh-pro-obrabeni>>.
- [18] MÁDL, J. *Optimalizace při obrábění (řezné parametry)*. 1998 [on-line]. [cit. 2010-11-06]. Dostupné z: <<http://fstroj.utc.sk/journal/sk/013/013.htm>>.

Seznam příloh

Příloha A: Návrh softwaru pro optimalizaci řezných podmínek.xlsx.